



Année Universitaire : 2015-2016



Master Sciences et Techniques : Géorressources et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Modélisation Hydraulique des crues du bassin versant de l'oued Tamraght, Souss Massa

Présenté par:

DAIDE Fatima

Encadré par:

- Mr. A. ELMENAOUI, ABHSMD
- Pr. A. LAHRACH, FST – Fès
- Pr. M. FAOUZI, EMI- Rabat

Soutenu le 14 Juin 2016 devant le jury composé de:

- Pr. Abderrahim Lahrach
- Pr. Abdel-Ali Chaouni
- Pr. Lahcen Benaabidate
- Pr. Mohammed Benabdelhadi

Stage effectué à : ABHSMD,





Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: Fatima DAIDE

Année Universitaire : 2015/2016

Titre: Modélisation hydraulique du bassin versant de l'oued Tamraght

Résumé

La situation du centre d'Aourir au pied du Haut Atlas occidental, le rend vulnérable aux crues violentes et subites des nombreux talwegs qui le surplombent et les cours d'eaux qui le traversent, dont oued Tamraght. Ce dernier, sujet de la présente étude, contrôle un bassin versant de 460 km², son orientation vers l'Atlantique lui permet de drainer l'extrémité occidentale du Haut Atlas, constituant ainsi un danger potentiel à cause de la violence de ses crues (1957, 1982, 1992, 1995, 1996, 1998, 2010 et 2014).

La zone montagneuse qui constitue les bassins versants et qui domine le centre, est connue par ses pluies torrentielles et donc des maximales journalières importantes. Les pentes des cours d'eau étant relativement fortes réagissent rapidement aux fortes averses.

C'est dans cette optique que vient ce présent travail ayant pour objectif la réalisation d'un modèle hydraulique par HEC-RAS permettant de limiter, d'une part, les zones inondables pour chaque période de retour et de proposer, d'autre part, des aménagements de lutte contre les inondations sur oued Tamraght.

Mots clés: Haut Atlas Occidental – Aourir - Oued Tamraght - Bassin versant - Crues - HEC-RAS - Aménagements.



Dédicace

Je dédie ce mémoire

À mes très chers parents qui ont toujours été là pour me soutenir au long de mes études et qui m'ont donnés un magnifique modèle de labeur et de persévérance. . .

À mes frères

À mes chers(es) et fidèles(es) amis(es)

À mes professeurs pour leurs patiences et leurs soutiens qu'ils n'ont cessés d'apporter au cours de notre formation. . .

À tous ceux qui sont chère à mon cœur. . .

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout Dieu de m'avoir aidé...

Tous d'abord, je tiens à remercier mon encadrant **Mr.LAHRACH.A**, pour avoir accepté de m'encadrer et de me suivre tout au long de la réalisation de ce mémoire de fin d'étude, pour avoir montré un grand intérêt à ce travail, aussi pour ses conseils scientifiques très enrichissants, pour son précieux encadrement durant la réalisation de ce projet, et de l'ensemble des connaissances qui m'a fourni tout au long de ma formation.

Un sincère remerciement à mon maitre de stage, **Mr. El MENAOUI.A**, qui n'a jamais hésité à m'orienter et diriger durant toute la période de stage.

Je remercie tout les membres de jury composé de **Pr. Abderrahim Lahrach, Pr. Abdel-Ali Chaouni, Pr. Mohammed Benabdelhadi, Pr. Lahcen Benaabidate**, d'avoir accepté d'évaluer ce rapport. Je suis vraiment honoré de les voir comme membre de jury.

Je voudrai également rendre un hommage particulier à **Mr.BENAABIDAT.L**, chef de filière pour son soutien et son aide.

Un grand remerciement aussi à tous les professeurs de département de l'environnement, leurs encouragements et leurs soutiens moraux. D'une façon ou d'une autre, pour ceux qui m'ont aidé pendant mon travail de fin d'études, aussi pour **Pr. EL AAROUSI.O** par ses conseils, connaissances scientifiques, et son soutien.

Ma famille pour son encouragement et son soutien moral et matériel. Ce travail n'aurait jamais été achevé sans leurs soutiens illimité et leurs aides.

Mes amis avec qui j'ai partagé les moments de joie et de tristesse tout au long de notre formation.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur la zone d'étude

Introduction générale	1
Introduction	3
I) Cadre général de la zone d'étude	3
I.1. situation géographique	3
I.2. Géomorphologie	4
I.3. Le couvert végétal	4
II) Climatologie	5
II.1. Pluviométrie	5
II.1.1. Précipitations moyennes annuelles	5
II.1.2. Précipitations moyennes mensuelles	6
II.2. Température	8
II.3. Vent	8
III) Géologie	8
Conclusion	10

Chapitre II : Caractéristiques physiographiques du bassin versant de l'oued Tamraght

Introduction	12
I) Propriétés géométriques du bassin versant	12
I.1. surface	12
I.2. Périmètre	12
I.3. Indice de compacité de Gravelius	12
I.4. Longueur du cours d'eau principal	13
I.5. Rectangle équivalent	13
II) Caractéristiques topographiques	13
II.1. Carte du relief	13
II.2. Hypsométrie du bassin versant	14
II.3. Pente	16
II.3.1. Carte des pentes	17
II.3.2. Pente Moyenne	18
II.3.3. Indice de pente globale	18
II.3.4. La dénivelée spécifique	18
III) Réseau hydrographique	19
III.1. Densité de drainage	20
Conclusion	21

Chapitre III : Etude hydrologique

Introduction	22
I) Historique des crues	22
II) Estimation des temps de concentration par les formules empiriques	23
III) Etude fréquentielle des pluies maximales journalières	25
IV) Estimation des débits de pointe	25
IV.1. Débits estimés par les méthodes empiriques	25
IV.2. Ajustement des débits maximums instantanés	27
IV.3. Transposition à partir des bassins limitrophes	28
IV.4. Méthode du Gradex	29
Conclusion	32

Chapitre IV : Etude hydraulique

Introduction	33
I) Diagnostic de la situation actuelle	33
II) Reconstitution de la géométrie du cours d'eau	35
III) Modélisation hydraulique	36
III.1. Modélisation	36
III.2. Outils de modélisation	37
III.3. Construction du modèle	37
III.4. Débits et conditions aux limites	37
III.5. Coefficient de rugosité	38
IV) Visualisation et discussion des résultats	38
IV.1. Ligne d'eau	38
IV.2. Visualisation en trois Dimension du tronçon modélisé	39
IV.3. Vitesse d'écoulement	40
IV.4. Restitution de la courbe de tarage	41
IV.5. Simulation des crues de différentes périodes de retour	42
V) Résultats du diagnostic hydraulique	44
VI) Définitions des schémas d'aménagements	45
Conclusion	46
Conclusion générale	47
Références bibliographiques	49
Annexes	51

Listes des Figures

Fig.1 : Situation géographique de la zone d'étude	4
Fig.2 : Histogramme des pluies annuelles de la station Imi Mikki (1962-2015)	5
Fig.3 : Hyétogramme de la pluie moyenne mensuelle (1983-2015)	7
Fig.4 : Courbe des hauteurs cumulées des pluies mensuelles moyennes	7
Fig.5 : Carte géologique du bassin Tamraght	10
Fig.6 : MNT du bassin versant de l'Oued Tamraght	14
Fig.7 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Tamraght	15
Fig.8 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Tamraght	16
Fig.9 : Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Tamraght	17
Fig.10 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Tamraght	20
Fig.11 : Ajustement par la loi de Gumbel des Pj max de la station d'Imi miki	25
Fig.12 : Résultats de l'ajustement par la loi de Gamma	28
Fig.13 : Plan de diagnostic de l'état actuel	34
Fig.14 : Topographie de l'oued Tamarght et profils en travers	35
Fig.15 : Résultats de la géométrie du cours d'eau par HEC-RAS	36
Fig.16 : Ligne d'eau des tronçons modélisés de l'Oued Tamraght	39
Fig.17 : Vue du tronçon modélisé en 3D	40
Fig.18 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance à partir de l'exutoire	41
Fig.19 : Courbes de tarage obtenu à partir de HEC-RAS	41
Fig.20 : Plan des zones inondables	44

Listes des Tableaux

Tableau 1 : Résultats de calcul sur la série enregistrée dans la station Imi Mikki	6
Tableau 2 : Répartition hypsométrique du bassin versant de Tamraght	15
Tableau 3: Classes de pentes	17
Tableau 4 : Caractéristiques hydrographiques des oueds Tamraght et ses affluents	19
Tableau 5 : Fiche morphométrique du bassin versant de Tamraght	21
Tableau 6 : Formules empiriques du calcul des temps de concentration	24
Tableau 7: Temps de concentration retenu pour l'Oued Tamraght	24
Tableau 8 : Pluies maximales journalières par période de retour	25
Tableau 9 : Résultats des débits de pointe par les formules empiriques	27
Tableau 10 : Résultats de l'ajustement des débits de crues en période de retour par la loi de Gamma	28
Tableau 11 : Débits, coefficients de Franco-Rodier pour la station hydrologique voisine de Tamri	29
Tableau 12 : Pluies maximales journalières par période de retour	30
Tableau 13 : Pluies maximales journalières en 24 heures	30
Tableau 14 : Débits, lames d'eau ruisselées et volumes d'eaux pour différentes période de retour par la méthode du Gradex	32
Tableau 15 : Débits obtenus et retenus de différentes méthodes	37
Tableau 16 : Débits des périodes de retour nécessaires à la modélisation	39
Tableau 17 : Exemple des tableaux des résultats par HEC-RAS	43

Introduction générale

Les crues font partie du fonctionnement naturel d'un cours d'eau. Elles peuvent être différentes d'une année à l'autre et n'entraînent pas forcément des inondations, ou du moins des grandes catastrophes. En effet, l'ampleur des inondations arrive de façon périodique et dépend des conditions météorologiques. Les crues se produisent en général suite à une forte pluie de longue durée ou d'une fonte de neige. Qu'un pays au climat semi-aride comme le Maroc subit de temps à autre des inondations, ce n'est guère un paradoxe. On est presque tenté d'affirmer que l'aridité favorise l'apparition des crues violentes, car l'absence de couverture végétale et le type du sol soutient le ruissellement aux dépens de l'infiltration.

Aussi le risque d'inondation est le résultat de la présence à la fois d'un cours d'eau susceptible de déborder après de fortes précipitations. Il est à souligner que la vulnérabilité augmente fortement avec le développement urbain et que des situations de risques peuvent être créées là où il n'y en avait pas auparavant, d'où la nécessité d'une maîtrise de l'occupation des sols en zones inondables.

La situation du centre d'Aourir au pied du Haut Atlas occidental, le rend vulnérable aux crues violentes et subites des nombreux talwegs qui le surplombent et les cours d'eaux qui le traversent, dont oued Tamraght. Le centre se situe dans la vallée de confluence de ces oueds correspondant aussi à leur embouchure dans l'océan atlantique. De ce fait, la problématique d'inondation du centre est liée essentiellement à l'occupation du Domaine Public Hydraulique (DPH).

La zone montagneuse qui constitue les bassins versants et qui domine le centre, est connue par ses pluies torrentielles et donc des maximales journalières importantes. Les pentes des cours d'eau étant relativement fortes, en amont du centre, réagissent rapidement aux fortes averses.

Le lit majeur l'oued Tamraght, objet de notre étude, est occupé, à la traversée du centre, par des exploitations agricoles. Le seul ouvrage hydraulique se trouvant sur l'oued est le pont sur la RN1. Il est situé à environ 900 m en amont de l'embouchure.

En aval du pont, des habitations se trouvent en limite du lit mineur et sont exposées au risque d'inondation. Au niveau de certaines d'entre elles, des protections localisées (petits murets en maçonnerie) ont été aménagées, mais ces mesures restent insuffisantes pour leur protection.

C'est dans cette optique que vient ce présent travail qui a pour objectif la protection contre les inondations des zones de débordement de l'oued Tamraght.

Le présent rapport est présenté en quatre grands chapitres ; le premier chapitre sera consacré à une présentation générale de la zone d'étude à savoir son cadre géographique, climatique et géologique. Le deuxième chapitre comprendra l'analyse des différents paramètres physiques et géomorphologiques afin de bien comprendre les causes des variations des régimes hydrologiques du bassin versant étudié et par conséquent leur contribution dans la genèse des crues. Ensuite, le troisième chapitre sera consacré à une étude hydrologique afin de reconnaître les crues de projet par les aspects du débit de pointe calculés par les différentes méthodes statistiques, ainsi les débits retenus seront d'une importance capitale pour la simulation hydraulique de l'oued Tamraght. Enfin le dernier chapitre présentera, dans un premier temps, une étude hydraulique pour la mise au point d'un modèle hydraulique dans la prévention des crues et l'adaptation des interventions contre les effets des crues dans les zones inondables, puis dans un deuxième temps défini les schémas d'aménagements projetés au niveau de l'oued. Tout ceci s'inscrit sous un objectif final permettant, une protection contre les inondations des zones de débordement.

Chapitre I : Généralités sur la zone d'étude

Introduction

L'oued Tamraght contrôle un bassin versant de 460 km², son orientation vers l'Atlantique lui permet de drainer l'extrémité occidentale du Haut Atlas, constitué par les plateaux de formation secondaire du Crétacé. Le drainage au niveau du bassin versant se fait par un thalweg principal. L'oued Tamraght est caractérisé par un lit d'écoulement bien marqué le long de son tracé qui lui confère un régime d'écoulement torrentiel notamment dans les zones de reliefs.

Ce chapitre est consacré au premier lieu, à une description générale de la zone d'étude, à savoir sa situation géographique, géomorphologique, son couvert végétal, ensuite une étude climatique afin de comprendre les mécanismes intervenant dans la circulation des eaux et l'évolution des ressources en eau, enfin une étude géologique pour savoir les différentes formations géologiques dans la zone d'étude.

I) Cadre général de la zone d'étude

I.1. situation géographique

Le bassin versant de l'Oued Tamraght, objet de notre étude, se situe à 15km de la ville d'Agadir, entre les longitudes Lambert 90 et 128.5 km et les latitudes Lambert 396 et 422 km, il s'allonge dans une direction NE-SW orthogonalement à la ligne de crête littorale du Haut Atlas bordier qu'il draine. Il traverse le centre d'Aourir qui se trouve dans une vallée littorale située entre le relief du versant NW du Haut Atlas occidental et l'océan Atlantique. Cette vallée matérialise pratiquement l'exutoire du bassin versant, évacuant ses crues vers cet océan. (PDAIRE Souss Massa, 2011).

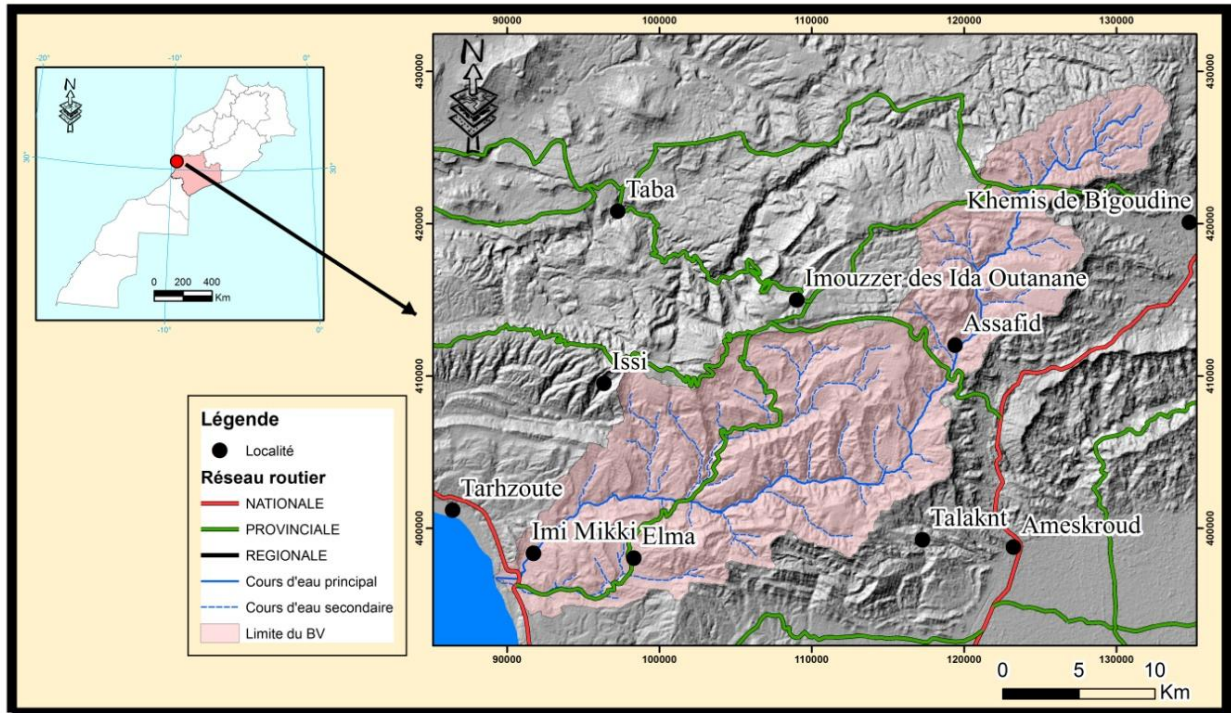


Fig.1 : Situation géographique de la zone d'étude (extraite du MNT de la carte topographique de Taghazoute 1/50000 et digitalisée)

I.2.Géomorphologie

La géomorphologie de la zone d'étude est caractérisée par une prédominance des montagnes qui constituent environ 75 % de la superficie de la commune d'Aourir. Ces montagnes dont les altitudes moyennes ne dépassent pas 1000 m appartiennent à la chaîne haute Atlasique. Quant aux plaines, elles occupent 25 % de la surface globale sur laquelle s'étend la commune. (ABHSMD, 2007).

I.3. Le couvert végétal

La forêt, en plus de son rôle économique et social, constitue une importante richesse et une barrière naturelle contre la désertification, l'érosion hydrique et éolienne.

Malgré l'existence d'une diversité forestière (arganier, chêne vert, thuya, puis, genévrier), l'arganier reste l'arbre le plus aperçu avec une prédominance d'environ 90 % de la superficie de la commune. Il reste quelques plantes hydrophiles notamment le Tamarix, le Laurier rose et le Rétame ainsi que plusieurs types de plante sauvages telle que le cactus et les Algues. (Monographie de la préfecture d'Agadir Ida Outanane).

II) Climatologie

L'étude des données climatiques est nécessaire à la compréhension des mécanismes intervenant dans la circulation des eaux superficielles et souterraines et dans l'évolution des ressources en eau. La région d'Agadir est classée parmi les régions semi arides. Cependant, la zone objet de l'étude échappe aux flux désertiques du sud du fait de la barrière de l'Anti-Atlas, de l'altitude et de la proximité de l'océan. Ce dernier est qualifié d'être un faible pourvoyeur des précipitations.

Dans cette étude climatique du bassin versant de l'oued Tamraght, une station pluviométrique a été prise en considération: la station d'Imi Mikki, qui est située à l'intérieur du bassin au point de coordonnées (X=92150 m, Y=398100 m, Z=40 m).

II.1. Pluviométrie

Les précipitations forment un paramètre hydrologique de grande importance dans le fonctionnement d'un bassin versant. Elles désignent toutes les eaux météorologiques qui tombent sur la surface de la terre sous différentes formes (liquide et solide). Elles sont provoquées par un changement de températures et de pression.

II.1.1. Précipitations moyennes annuelles

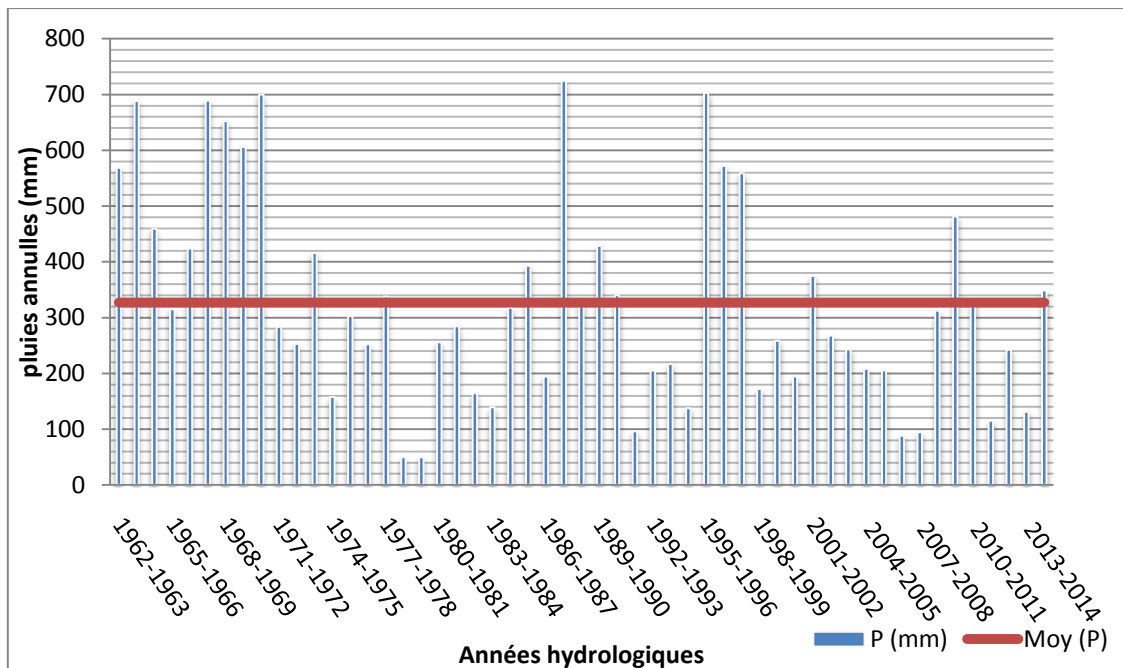


Fig.2 : Histogramme des pluies annuelles de la station Imi Mikki (1962-2015) (ABHSMD 2016)

L'histogramme représente les pluies annuelles sur tout le bassin entre 1962 et 2015. L'examen de cet histogramme révèle que:

- Les pluies annuelles enregistrées sont très variables d'une année à l'autre avec un coefficient de variation de 0.57 ;
- La pluie moyenne annuelle sur le bassin est de 327 mm;
- L'année la plus pluvieuse est l'année hydrologique 1987-1988 avec une valeur de 723.7 mm;
- L'année sèche est celle de 1978-1979 avec une pluviométrie de 49.4 mm.

II.1.2. Précipitations moyennes mensuelles

A partir des séries de pluies mensuelles (1983-2015) de la station pluviométrique Imi Mikki, nous avons calculé, la pluie moyenne, la pluie maximale, l'écart type et le coefficient de variation de chaque mois de l'année et le pourcentage de contribution de chaque mois dans la pluie annuelle. Le Tableau regroupe ces éléments :

Tableau 1 : Résultats de calcul sur la série enregistrée dans la station Imi Mikki (1983-2015)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Moy	3.3	23.4	48.8	47.2	34.5	33.4	29.7	13.0	4.1	0.6	0.1	1.4
Max	36.2	107.7	256.1	185.9	165.8	187.3	87.4	80	59.1	7.8	2.5	28.4
ET	8.4	27.86	58.7	55.1	42.35	46.37	27.74	17.5	11.5	1.93	0.44	5.29
CV%	2.5	1.19	1.20	1.17	1.23	1.39	0.93	1.35	2.82	3.21	4.42	3.78

Moy : Pluie Moyenne, Max : Pluie Maximale, ET : Ecart Type, CV% : Coefficient de variation.

A partir de ces pluies moyennes, l'hyétogramme et la courbe des hauteurs cumulées (Fig.3) ont été analysées :

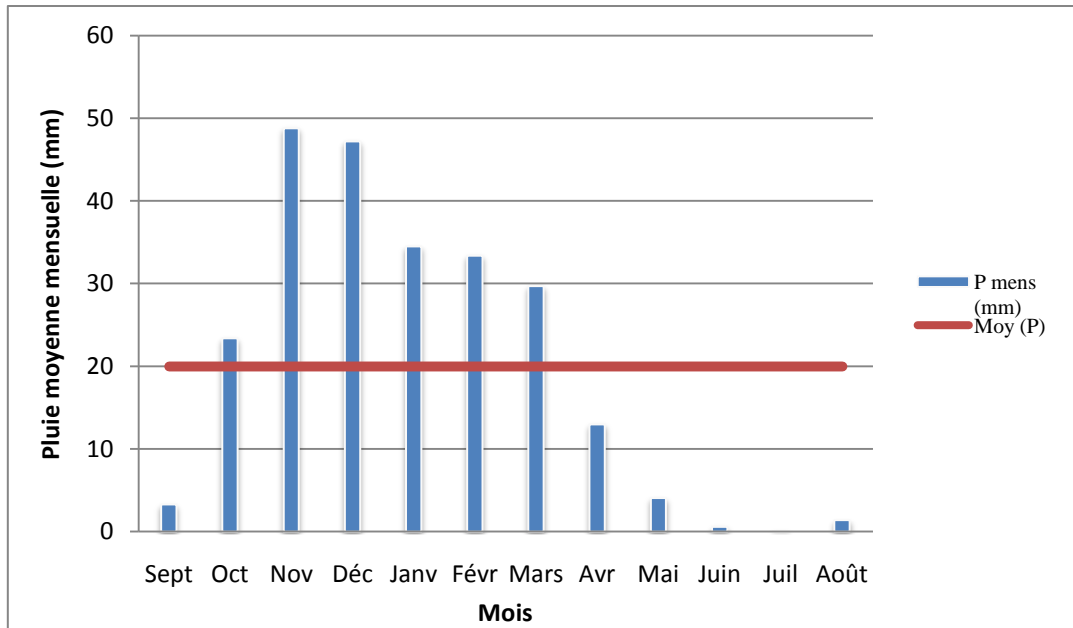


Fig.3 : Histogramme de la pluie moyenne mensuelle (1983-2015) (ABHSMD 2016)

L'examen de l'histogramme de la pluie moyenne de chaque mois (fig.3), montre que:

- La distribution des pluies moyennes est dissymétrique gauche avec un maximum au mois de novembre;
- Le mois de décembre est le mois qui a connu le plus des précipitations, avec une valeur moyenne de 49 mm;
- La saison pluvieuse s'étale d'octobre à mai avec d'importantes périodes de sécheresses
- Les mois de juin, juillet et d'août ont connu des précipitations quasi-nulles.

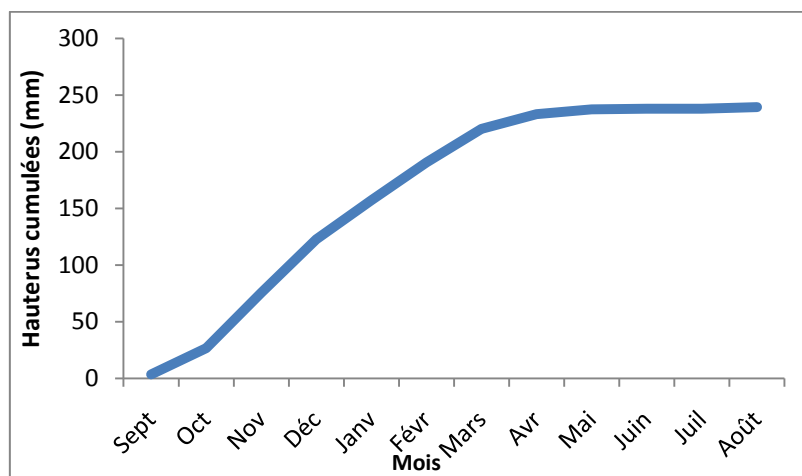


Fig.4 : Courbe des hauteurs cumulées des pluies mensuelles moyennes (1983-2015) (ABHSMD 2016)

L'examen de la courbe des hauteurs cumulées (fig.4) montre que:

- Cette courbe présente une forme étalée en S;
- Du mois d'octobre au mois d'avril, les précipitations se cumulent graduellement;
- A partir du mois d'avril, le cumul des précipitations est quasi-statique du fait de la rareté des précipitations durant ces mois.

II.2. Température

La température est un paramètre très important, vu qu'elle intervient d'une part comme élément déterminant pour la spécification du climat et d'autre part comme facteur essentiel pour l'estimation des potentialités hydrologiques d'une région donnée.

Les températures moyennes sont de l'ordre de 13°C maximum en janvier et de 33°C en juillet et août. La moyenne des températures moyennes est de 19,8°C. Les températures ne s'abaissent jamais au dessous de zéro. Durant les dix dernières années le climat a été marqué par d'importantes périodes de sécheresse. (ABHSMD 2014).

II.3. Vent

La proximité de l'Océan et l'influence du courant froid des Canaries atténuent le climat de la zone et la barrière montagneuse de l'Anti-Atlas, contribue à la protection contre les vents chauds du sud quoique la région n'est pas à l'abri des aléas, vu sa position géographique de réception des vents et des précipitations, en addition à la relativité à l'exposition des versants étant donnée que la zone est caractérisée par un climat de prédominance aride et un fort ensoleillement (3.089 heures/an), et des pentes.

La moyenne mensuelle des vitesses du vent, varie de 4.30 km/h en janvier et 9.64 km/h en mai et l'intensité la plus élevée s'observe durant la période allant d'avril à août. Le sens des vents est en général nord-ouest. Toutefois, durant la période juillet-août, le vent souffle du sud-est. Il s'agit du Chergui. (ABHSMD 2014).

III) Géologie

Le secteur d'étude fait partie du flan sud du haut Atlas occidental. Il est limité au sud par la vallée de Souss qui constitue un bassin triangulaire très fortement individualisé entre le puissant massif du Haut Atlas au Nord et les plateaux élevés de l'Anti Atlas au Sud et enfin l'Océan Atlantique à l'Ouest. Cette vallée appartient, elle même au Sillon Pré-africain qui sépare le domaine géologique ancien (Précambrien) de l'Anti Atlas au Sud et les domaines plus récents (Primaire, Secondaire et Tertiaire) au Nord.

Au secondaire, la plaine du Souss à vocation subsidente s'étendait au Sud d'Agadir tandis qu'au Nord se dressait une zone montagneuse en voie de formation. Cette discontinuité se traduit par l'accident d'Agadir, qui est l'un des plus importants de tout le domaine Atlasique occidental. Dans ces conditions, le séisme d'Agadir apparaît comme la conséquence d'un rejeu actuel de cet accident.

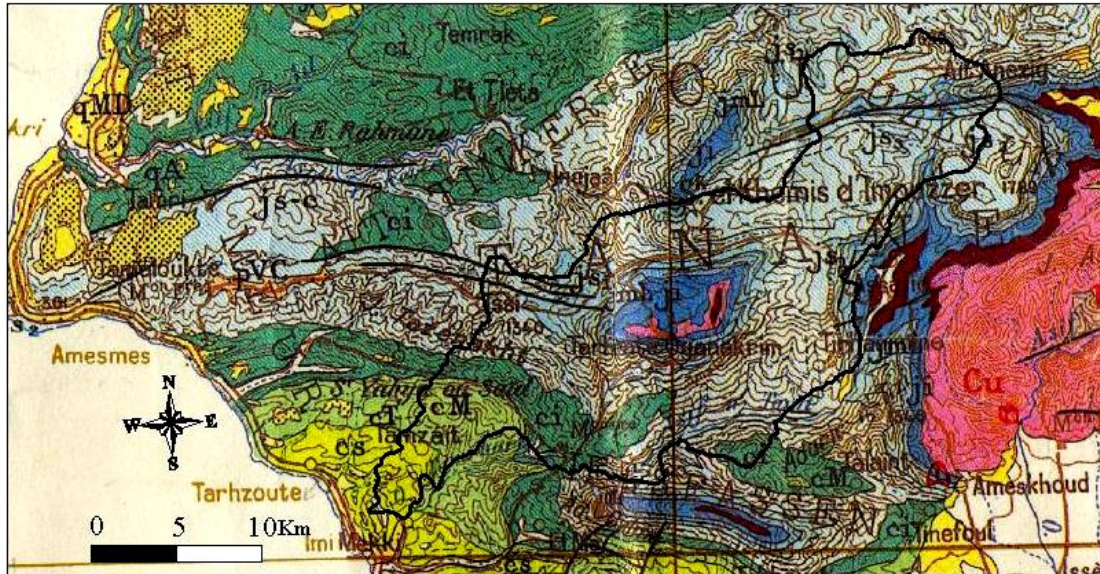
Le bassin versant de Tamraght se présente sous forme d'un fuseau allongé de direction SSW-NNE. Il est situé entre Imouzzer Idaoutanane et Taghazout traversant Aourir (Fig.5).

Du point de vue stratigraphique, la série secondaire qui surmonte le socle paléozoïque, débute par le Permo-Trias, qui affleure sur une surface très réduite ne dépassant pas les 5 Km². Il est caractérisé par des conglomérats de base, des grès rouges, des argiles et des basaltes doléritiques.

Le lias affleure localement au centre du bassin sous forme généralement calcaire-dolomitique avec des passages de grès et argiles encadrant les affleurements permo-triasiques.

Presque la totalité du bassin est ancrée dans des terrains de jurassique supérieur. Les affleurements les plus étendus sont ceux des faciès calcaire-dolomitiques du Kimmeridgien, surmontés des marnes gypsifères intercalées de grès, conglomérats et calcaires du Portlandien. Ces deux faciès dominent toute la partie septentrionale, centrale et centro-méridionale du bassin.

Dans sa partie méridionale (Aval), le bassin est occupé par des affleurements crétacés à dominance marneuse. En direction de Taghazout, on trouve d'abord du Crétacé inférieur marin (infra-Cénomaniens) caractérisé par des dépôts marno-gréseux puis des marnes cénomaniennes, ensuite des calcaires à silex du Turonien et enfin un faciès marneux phosphaté du Sénonien inférieur près de la zone côtière de Taghazout. (Ressources en Eau du Maroc. Tome 2)



Légende

A	Formations modernes et Quaternaire récent, (alluvions, limons alluvionnaires, limons rouges superficiels)	j^c	Jurassique lagunaire d'Imi n' Tanout
D	Dunes vivres et sables récents partiellement fixés	j^{s-c}	Bornasien (et Portlandien p.p.)
qMD	Quaternaire marin et dunaire consolidé	j^a	Kimmeridgien et Portlandien
q^c	Quaternaire moyen et ancien (briqs dépôts érosifs etc...)	j^{a₁}	Jurassique non subdivisé de l'O. Tensift
q^A	Terrasses	j^s	Lusitanien
q^C	Arènes granitiques	j^{s₁}	Callové-Oxfordien (et Argovien)
q^{Cl}	Calcaires lacustres	j^{mL}	Jurassique moyen lagunaire
q^T	Traçertins	jⁱ	Lias non subdivisé
VC	Terrasses anciennes	rl	Permo-Trias continental
csM	Maestrictien	hr	Stéphano-Autunien continental
cs	Sénonien	tr	Basaltes doléritiques du Trias
cs^C	C, faciès continental		
cT	cT Tortonien		
c	Cénozoïque		
cM	cM Cénomannien		
	c Crétacé non subdivisé		

Fig.5 : Carte géologique du bassin Tamraght (extraite de la carte géologique de Taghazoute 1/50000)

Conclusion

Le bassin versant de l'Oued Tamraght s'allonge dans une direction NE-SW orthogonalement à la ligne de crête littorale du Haut Atlas bordier qu'il draine, traversant le centre d'Aourir. Sa géomorphologie, est caractérisée par une prédominance des montagnes appartenant à la chaîne haute Atlasique et son couvert végétal est dominé par l'arganier.

L'étude climatique de notre zone d'étude est basée sur l'exploitation des données pluviométriques, de températures et de vents de la station Imimiki. Cette étude nous a permis de déceler un certains nombres de caractères climatiques. Les précipitations recueillies entre 1962 à 2015, sont différentes d'une année à l'autre, avec une moyenne annuelle de 327 mm, ainsi la saison pluvieuse s'étale d'octobre à mai avec d'importantes périodes de sécheresses. L'étude de la température montre que l'été est la saison la plus chaude alors l'hiver est la plus froide avec une moyenne qui oscille entre 13 °C en janvier et 33 °C en juillet août.

Quant au vent, la moyenne mensuelle des vitesses varie de 4.30 km/h en janvier et 9.64 km/h en mai. Le sens des vents est en général nord-ouest. Toutefois, durant la période juillet-août, le vent souffle du sud-est. Il s'agit du Chergui.

L'oued prend ses sources des calcaires jurassiques situés à l'amont du bassin versant du côté Est. Les cours d'eau entaillent ensuite des terrains crétacés qui forment le paysage dominant de ce bassin versant jusqu'à l'exutoire de l'oued vers l'océan Atlantique.

Chapitre II : Caractéristiques physiographiques du bassin versant de l'oued Tamraght

Introduction

Les principales caractéristiques physiographiques et géomorphologiques d'un bassin versant étudié ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage.

La délimitation du bassin versant de l'oued Tamraght, le calcul de ses propriétés géométriques (son aire, son périmètre et sa forme) et topographiques, l'orientation des pentes et les tranches d'altitudes, ainsi que le réseau hydrographique sont extraits d'un module numérique de terrain (MNT).

I) Propriétés géométriques du bassin versant

I.1.surface

La surface du bassin versant, correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface du bassin versant, exprimée en km^2 , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation.

Dans notre étude la surface du bassin versant qui est **460 km^2** est déterminée à partir de la carte topographique (1/50.000) de Taghazout.

I.2. Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de limite du bassin versant, il est exprimé en Km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Le périmètre de ce bassin est de **132 Km**.

I.3. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (K_G) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

P : périmètre du bassin en Km

S : surface du bassin en Km²

Kc : Indice de compacité de Gravelius

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

Le bassin d'Oued Tamraght a un indice de compacité égale à **1,72**. Sa forme est donc allongée, ce qui favorise, pour une même pluie, de faibles débits de pointe des crues à cause du retard de l'acheminement des eaux à l'exutoire.

I.4. Longueur du cours d'eau principal

C'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à la ligne des partages des eaux d'un bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en km. La longueur du cours d'eau de la zone d'étude est de **69 km**.

I.5. Rectangle équivalent

On assimile par convention le bassin versant à un rectangle qui lui est équivalent en superficie. Ses dimensions sont définies à partir de son indice de compacité Kc et de sa superficie S, par ce qui suit :

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right) \quad L = 47.4 \text{ Km}$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right) = \frac{A}{L} \quad l = 7.9 \text{ Km}$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en km

l : Largeur du rectangle équivalent en km.

II) Caractéristiques topographiques

II.1. Carte du relief

Le relief du bassin a été caractérisé sur la base d'un modèle numérique de terrain MNT à résolution 30*30m, établi sur la base de la carte topographique digitalisée au 1/50.000 de Taghazout.

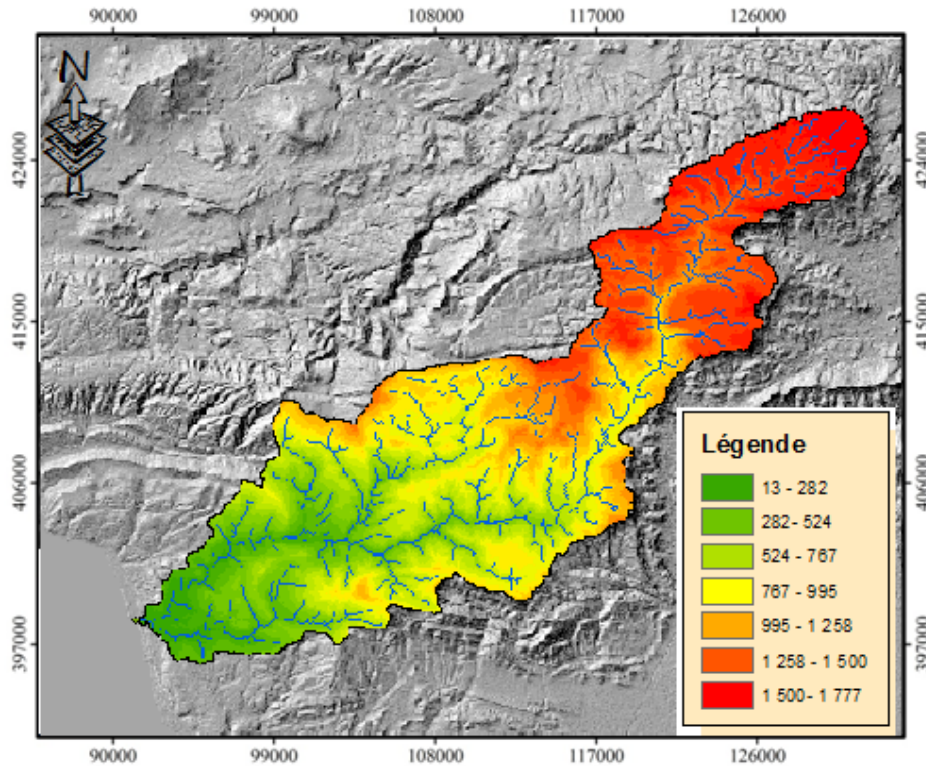


Fig.6 : MNT du bassin versant de l'Oued Tamraght (extrait de la carte topographique 1/50000 et digitalisé)

II.2.Hypsométrie du bassin versant

Pour mieux comprendre les variations d'altitude au sein du bassin versant de Tamraght, on va appliquer une méthode qui permet grâce à un histogramme, une courbe et une carte hypsométrique de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude.

La courbe hypsométrique est obtenue par planimétrie des surfaces comprises entre les courbes de niveau et qui différencient les différentes tranches d'altitudes.

Chaque tranche d'altitude correspond à une superficie et un pourcentage de la surface totale du bassin (Fig.7).

La carte hypsométrique est réalisée après visualisation de la courbe hypsométrique (Fig.8).

Les mesures sont résumées dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Répartition hypsométrique du bassin versant de Tamraght

Altitude (m)	Superficie entre les courbes		% au dessus de la limite inférieure
	en km ²	en %	
0-100	667	1,7%	100%
100-200	901	2,3%	98,3%
200-300	1055	2,7%	96,0%
300-400	2154	5,5%	93,3%
400-500	2075	5,3%	87,9%
500-600	2656	6,7%	82,6%
600-700	2756	7,0%	75,9%
700-800	4218	10,7%	68,9%
800-900	5945	15,1%	58,2%
900-1000	3155	8,0%	43,1%
1000-1100	2252	5,7%	35,0%
1100-1200	1497	3,8%	29,3%
1200-1300	1699	4,3%	25,5%
1300-1400	1481	3,8%	21,2%
1400-1500	5516	14,0%	17,5%
1500-1600	1232	3,1%	3,4%
1600-1700	125	0,3%	0,3%

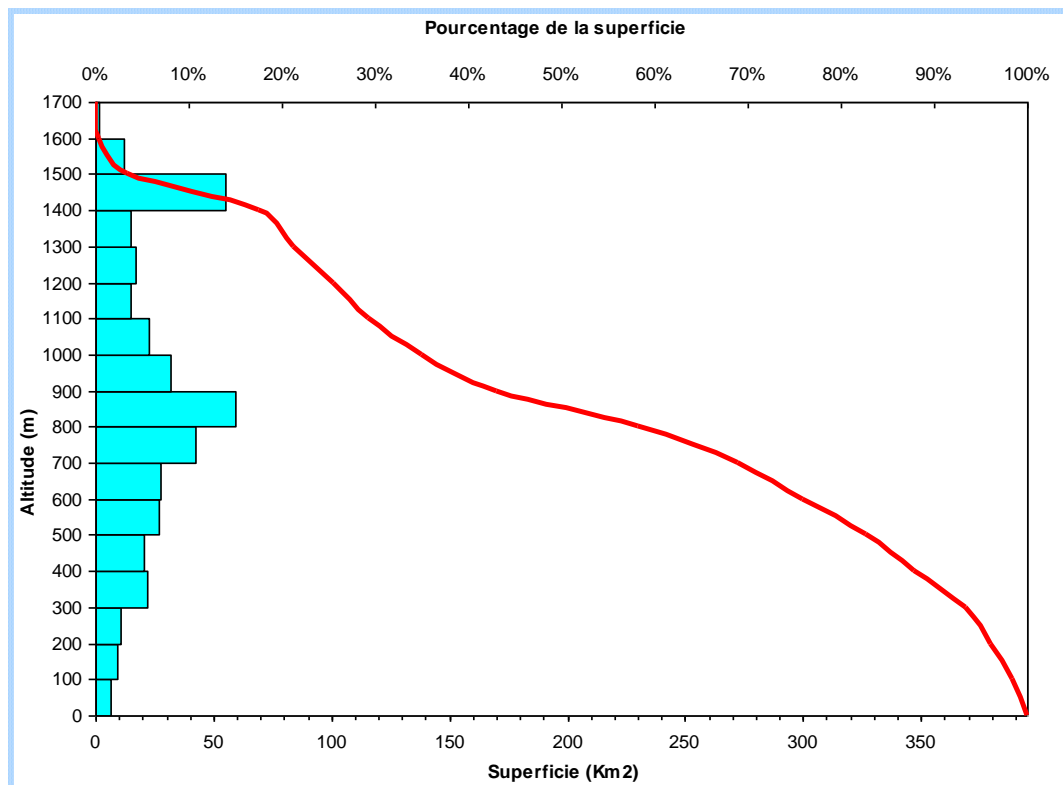


Fig.7 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Tamraght

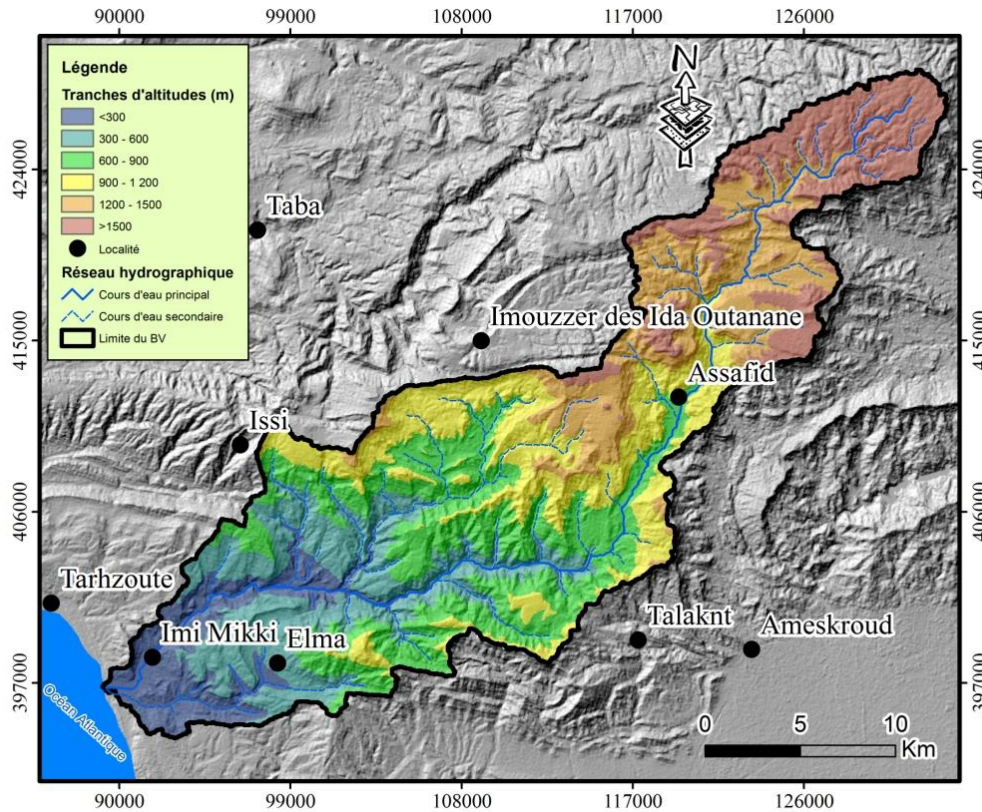


Fig.8 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Tamraght (extraite de la carte topographique 1/50000 et digitalisée)

L'examen de ces données montre que :

- Le bassin a une pente très élevée
- La quasi totalité du bassin est située au dessus de 150 m d'altitude et plus de 70% de sa surface se situe au-dessus de 700 m.
- L'altitude maximale : $H_{max} = 1700\text{ m}$.
- L'altitude minimale : $H_{min} = 0\text{ m}$.
- L'altitude médiane : $H_{med} = 892\text{ m}$.
- L'altitude moyenne: $H_{moy} = 886\text{ m}$.
- L'altitude la plus fréquente: $H = 900\text{ m}$.
- L'altitude limitant 5 % de la surface la plus élevée : $H_5 = 1530\text{ m}$.
- L'altitude limitant 95 % de la surface la plus basse : $H_{95} = 228\text{ m}$.

II.3.Pente

La pente est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le

temps de parcours du ruissellement direct et influence directement sur le débit de pointe lors d'une averse.

II.3.1. Carte des pentes

Les classes de pente sont déduites d'un modèle numérique de terrain. Le MNT est extrait du SRTM du Maroc (Résolution 30 m de coté de pixel).

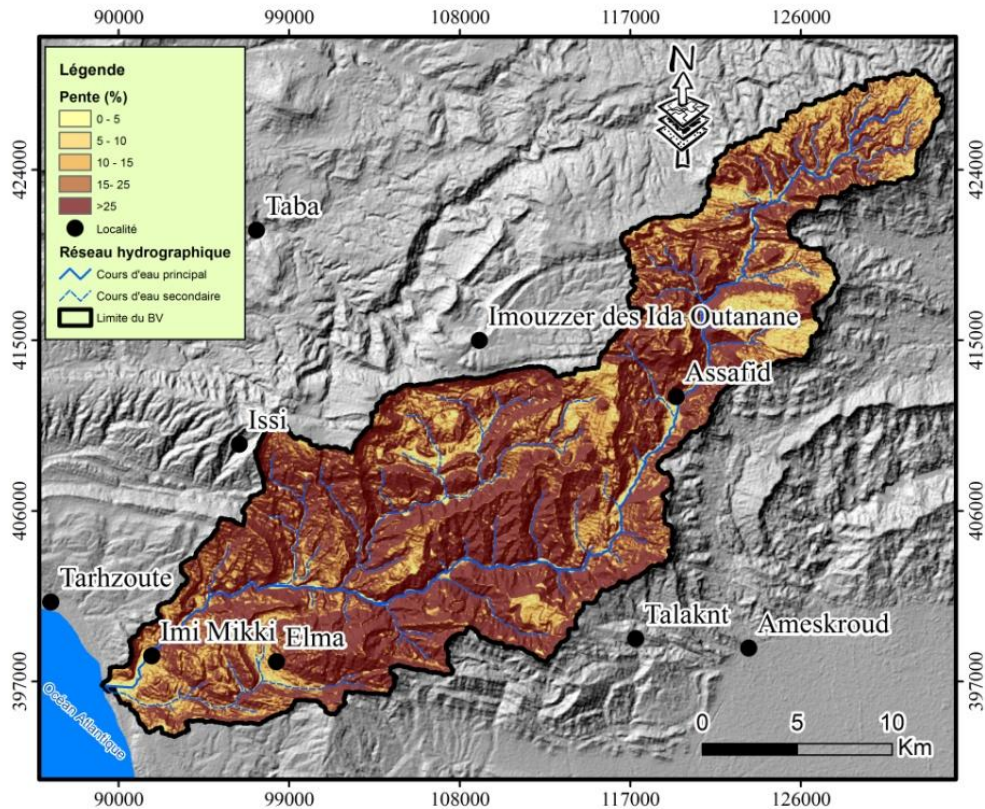


Fig.9 : Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Tamraght (extraite de la carte topographique 1/50000 et digitalisée)

Selon le tableau 3, on peut déduire que les pentes du bassin de Tamraght sont en majorité fortes (>35%).

Tableau 3: Classes de pentes (Baize, 1995)

Pentes	Classes de pentes
0 – 2	Très faible à faible
2 – 5	Faible à modérée
5 – 10	Modérée
10 – 15	Modérée à forte
15 – 30	Forte
> 50	Très forte

II.3.2. Pente Moyenne

La pente moyenne du bassin versant est donnée par ROCHE (1963) comme étant la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$P_{moy} = 2 \frac{H_{moy}}{L} \qquad P_{moy} = 25.68 \text{ m/km} = 2.56 \%$$

Avec :

P_{moy} : pente moyenne du bassin ;

H_{moy} : l'altitude moyenne du bassin(m) ;

L : longueur du cours d'eau principal en (Km).

II.3.3. Indice de pente globale

Pour éviter les valeurs extrêmes, L'Institut de Recherche et Développement en France (IRD) a proposé la définition d'un indice global de pente d'un bassin versant, il sert à classer le relief des bassins

$$I_g = \frac{D_u}{L_{eq}} \qquad I_g = 27.46 \text{ m/km}$$

Avec :

D_u : $H_{5\%} - H_{95\%} = 1302 \text{ m}$, la dénivelé utile est l'altitude entre laquelle s'inscrit 90% de la surface du bassin.

$H_{5\%}$: altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin au dessus de $H_{5\%}$;

$H_{95\%}$: altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin versant de $H_{95\%}$;

I_g : indice de pente globale ;

L_{eq} : longueur du rectangle équivalent.

L'indice de pente influence la réponse du bassin au niveau du volume écoulé, de la forme de l'hydrogramme de débit écoulé et très particulièrement au niveau de la durée de l'écoulement et de l'enregistrement du débit max.

II.3.4. La dénivelée spécifique

L'indice de pente global décroît pour un même bassin lorsque sa surface augmente. La comparaison des pentes de bassins de taille différente se fait en se basant sur le dénivelé spécifique qui dérive de la pente globale en la corrigeant de l'effet de la surface.

$$D_s = I_g \sqrt{A} \qquad D_s = 579.08 \text{ m}$$

Avec :

D_s = dénivelée spécifique ;

A= surface du bassin versant (Km²) ;

Ig =indice de pente globale.

III) Réseau hydrographique

L'aridité du climat, l'irrégularité habituelle des pluies et des cours d'eau expliquent l'importance de l'eau dans la région.

Le réseau hydrographique dans la zone d'étude est caractérisé par l'importance de l'oued Tamraght, ainsi que d'autres petites chaâbats. Ces chaâbats présentent un régime d'écoulement torrentiel basé sur des crues relativement fréquentes. De ce fait, ils n'assurent pas un débit d'étiage. Ils sont également caractérisés par un transport solide important sous forme de «tout venant» et de galets de différentes tailles.

L'oued Tamraght, depuis sa naissance jusqu'à l'entrée de la ville, est caractérisé par un lit bien marqué avec des pentes relativement fortes. La section du lit de l'oued est variable de l'amont vers l'aval. Sur la traversée du centre d'Aourir, la largeur du lit mineur varie de 40 m à 190 m.. Au niveau de l'embouchure, la largeur de l'oued dépasse 145 m.

Le seul ouvrage hydraulique qui se trouve sur l'oued est le pont sur la RN1. Il est situé à environ 900 m en amont de l'embouchure. La débitance maximale de ce pont, sans déversement sur la chaussée, est d'environ 440 m³/s par pertuis soit une débitance globale de 1320 m³/s.(ABHSM.,2014. Mission1).

Tableau 4 : Caractéristiques hydrographiques des oueds Tamraght et ses affluents

Oued	Affluents	Distance * (km)	Long- ueur (m)	Altitude amont (m)	Altitude Aval (m)	Pente moy.
Oued Tamraght	Ighzer Taskint	12,8	10,7	1050	170	8%
	Assif N'taghrate	17,7	20,8	1520	300	6%
	Ighzer Nadar Ou Amane	27,9	4,6	1100	500	13%
	Ighzer Adarabene	28,6	5,3	1180	500	13%
	Assif Idmen	44,3	6,1	1400	870	9%
	Affluent 1	20,7	5,6	800	400	7%
	Affluent 2	24,9	8,2	940	390	7%
	Assif Issafen	51,4	7,4	1520	1050	6%

* distance de la confluence de l'affluent avec l'oued principal à partir du point le plus bas du bassin.

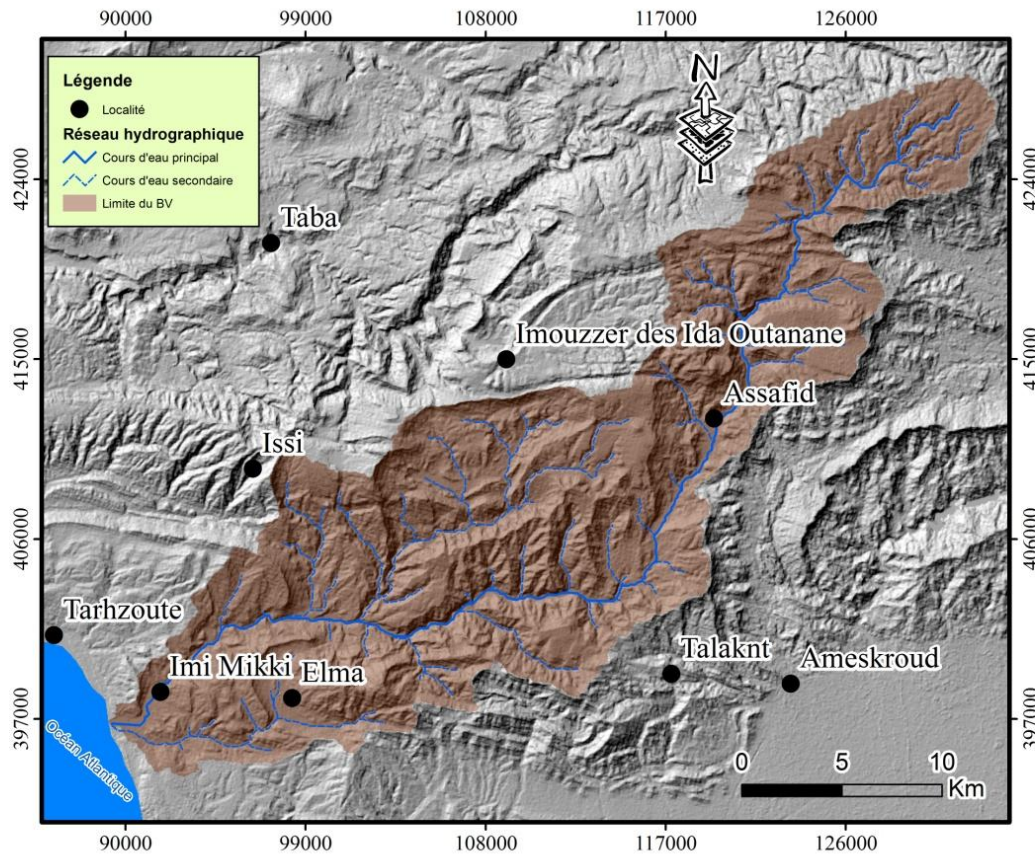


Fig.10 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Tamraght (Extraite de la carte topographique de taghazoute 1/50000 et digitalisée)

III.1.Densité de drainage

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné de superficie A comme étant la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km² ou en km⁻¹. Elle est donc :

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

Avec :

Li : Longueur totale des cours d'eau en km

A : Superficie du bassin versant en km².

La valeur de la densité de drainage est de **0.2 Km⁻¹**.

Conclusion

L'analyse de ces différents paramètres physiques et géomorphologiques permettra une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques du bassin versant étudié et par conséquent leur contribution dans la genèse des crues.

Ces paramètres sont récapitulés dans le tableau 5. Cette liste est loin d'être exhaustive, mais elle est suffisamment vaste pour englober de nombreuses particularités du bassin versant susceptibles d'être liées au comportement hydrologiques du bassin.

Tableau 5 : Fiche morphométrique du bassin versant de Tamraght

Paramètres	Valeur
Superficie en (km ²)	460
Périmètre en (km)	132
Longueur oued (km)	69
Indice de Gravelius	1.72
Longueur rectangle équivalent (km)	47.40
Largeur du rectangle équivalent (km)	9.7
Altitude max (m)	1700
Altitude min (m)	0
Altitude à 5% (m)	1530
Altitude à 95% (m)	228
Pente moyenne oued (%)	2.56
Dénivelée (m)	1302
Dénivelée spécifique (m)	579.08
Densité de drainage (km ⁻¹)	0.2

Chapitre III : Etude hydrologique

Introduction

Ce chapitre a pour objectif de faire une étude hydrologique afin de reconnaître les crues de projet par les aspects du débit de pointe. Les débits retenus seront d'une importance capitale pour la simulation hydraulique de l'oued Tamraght. Pour cela, il faut passer par plusieurs étapes à savoir une enquête de crues afin de trouver les laisses de crues passés et à recueillir les témoignages des habitants, ensuite une estimation des temps de concentration par différentes formules, ainsi une étude fréquentielle des pluies journalières maximales pour déterminer les $P_j \max(T)$ pendant une période de retour allant de 10 à 100 ans est aussi nécessaire, enfin une estimation des débits de pointes par différentes formules empiriques, par ajustements des débits maximums journaliers des stations les plus proches de la zone d'étude et par la méthode du Gradex.

I) Historique des crues

En se référant à la mémoire locale, le centre d'Aourir a connu plusieurs événements de crues.

Ils sont survenus dans les années 1957, 1982, 1992, 1995, 1996, 1998, 2010 et 2014. Malgré l'importance de ces crues, aucune information archivée sur la description de ces crues et l'importance des dégâts engendrés n'est disponible. Les témoignages de la population locale et des représentants de la commune ont été recueillis.

- La crue de 1957 a causé, comme principal dégât, la destruction du pont sur l'oued Tamraght ainsi que la perte de la production de 30 ha de terres agricoles. Lors de cet événement qui a duré 1 à 2 jours, l'oued Tamraght a changé de cours, en aval du pont de la RN 1, en prenant une direction nord-ouest à 100 m de son lit puis retrouver en aval son lit initial.

- La crue de 1982 était relativement moins importante que celle de 1957. Le seul dégât enregistré concerne le pont de l'oued Tamraght, qui a été partiellement détruit. Quant à la crue d'octobre 1992, elle a engendré l'inondation de la zone urbaine d'Aourir sans dégâts matériels ou humains.

- Les dégâts des crues de 1996 et 1998 des oueds Tamghart, Asserssif et autres chaâbats de la zone d'étude sont exposés comme suit :

- Inondation du café et des habitations qui se localisent à la limite du lit mineur de l'oued Tamraght, en aval de la Route nationale 1, lors de la crue de 1996. La lame d'eau a

atteint 0.30m de hauteur ce qui a entraîné la détérioration des équipements du café. Suite à ces inondations, plusieurs murs ont été construits pour la protection des habitations.

- Inondation de la décharge publique particulièrement la partie qui juxtapose le lit de l'oued en rive gauche. Ce qui a entraîné la pollution de la zone aval du lit de l'oued.

- Submersion de l'ensemble des ouvrages sur les chaâbats sur la route d'Imi Mikki ainsi que les habitations limitrophes.

- Inondation des zones agricoles notamment en rive gauche sur l'oued Tamraght

- Seuil d'irrigation sur l'oued Tamghart détruit lors de la crue de 1998.

- La crue de 2010 s'est produite pendant la semaine allant du 14/02 au 19/02. Elle a causée des dégâts colossaux à savoir :

- Destruction des puits, seguias et parcelles agricoles se situant sur les plaines alluviales des deux oueds.

- Inondation et destruction des principales voies et par conséquent l'enclavement des douars vers lesquelles elles mènent.

- Destruction de la partie amont du pont se situant sur la Route Nationale 1 traversant l'oued Tamraght.

- La crue de 2014 s'est manifestée vers la fin de la dernière semaine du mois de 11/2014. D'après la population locale, la pluie s'est précipitée pendant 5j dont 1 journée sans cesse (24h). Toutefois, cette crue a causé des débordements sur les voies et les parcelles agricoles sans pour autant engendrer les mêmes dommages que celle de 2010.

II) Estimation des temps de concentration par les formules empiriques

Le temps de concentration (T_c) des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point situé le plus loin possible de l'exutoire pour atteindre ce dernier.

Théoriquement on estime que T_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

Dans cette étude nous avons calculé le temps de concentration par les formules empiriques suivantes:

Tableau 6 : Formules empiriques du calcul des temps de concentration

Nom de la formule	Formule de Tc
Giandotti	$T_c = 60 * (4 * S^{0,5} + 1,5 * L) / (0,8 * H^{0,5})$ <i>Tc : en minute/ L : en Km/ S : en km²/ H : Dénivelée en m</i>
Turrazza & Passini	$T_c = 60 * 0,108 * (L * S)^{0,333} * I^{0,5}$ <i>Tc : en minute/ L : en Km/ S : en km²/ I : en m/m</i>
Ventura	$T_c = 76,3 * (S/I)^{0,5}$ <i>Tc : en minute/ L : en Km/ S : en km²/ I : en %</i>
Kirpich	$T_c = L^{0,77} * I^{0,385} / (52 * 60)$ <i>Tc : en minute/ L : en m/ S : en km²/ I : en m/m</i>
Formule Espagnole	$T_c = 18 * (L/1000)^{0,77} * I^{0,1925}$ <i>Tc : en minute/ L : en m/ S : en km²/ I : en m/m</i>
Van Te Chow	$T_c = 60 * 0,123 * (L * I^{0,5} / 1000)^{0,64}$ <i>Tc : en minute/ L : en m/ S : en km²/ I : en m/m</i>
Formule Californienne	$T_c = 60 * 0,1452 * (L * I^{0,5} / 1000)^{0,77}$ <i>Tc : en minute/ L : en m/ S : en km²/ I : en m/m</i>
Formule de US Corps	$T_c = 16,682 * (L * I^{0,25} / 1000)^{0,77}$ <i>Tc : en minute/ L : en m/ S : en km²/ I : en m/m</i>

Le tableau 7 récapitule les diverses valeurs du temps de concentration obtenues par ces formules. La valeur du temps de concentration retenue est la moyenne des valeurs proches. On a éliminé les valeurs extrêmes très grandes ou très petites pour ne laisser que les valeurs centrales.

Tableau 7: Temps de concentration retenu pour l'Oued Tamraght

<u>Bassin versant de l'Oued Tamraght</u>	<u>Ventura</u>	<u>Espagnole</u>	<u>Van Te Chow</u>	<u>Californienne</u>	<u>US Corps</u>	<u>Kirpich</u>	<u>Turrazza / Passini</u>	<u>Giandotti</u>	<u>Valeur retenue [h]</u>
	17.2	15.9	6	0.9	14.7	0.12	21.5	6.6	16

Les Tc calculés par les formules de Kirpich, Californienne, Van Te Chow et Giandotti donnent des valeurs sous estimées que l'on ne va pas retenir.

Les Tc calculés par les formules empiriques de Ventura et Espagnole sont comparables à ceux calculés par la formule d'US Corps. Aussi, retiendrons-nous la moyenne des ces trois formules. La valeur adoptée de Tc est de 16h.

III) Etude fréquentielle des pluies maximales journalières

Dans cette étude, on a ajusté les pluies maximales journalières de la station pluviométrique d'Imi Miki, située à l'intérieur du bassin de l'oued Tamraght au point des coordonnées (X=92150 m, Y=398100 m, Z=40 m), pour une série d'observation de 32 ans par la loi de Gumbel (annexe 3), cet ajustement a permis d'estimer les valeurs des précipitations pour différentes fréquences de retour (Fig.11).

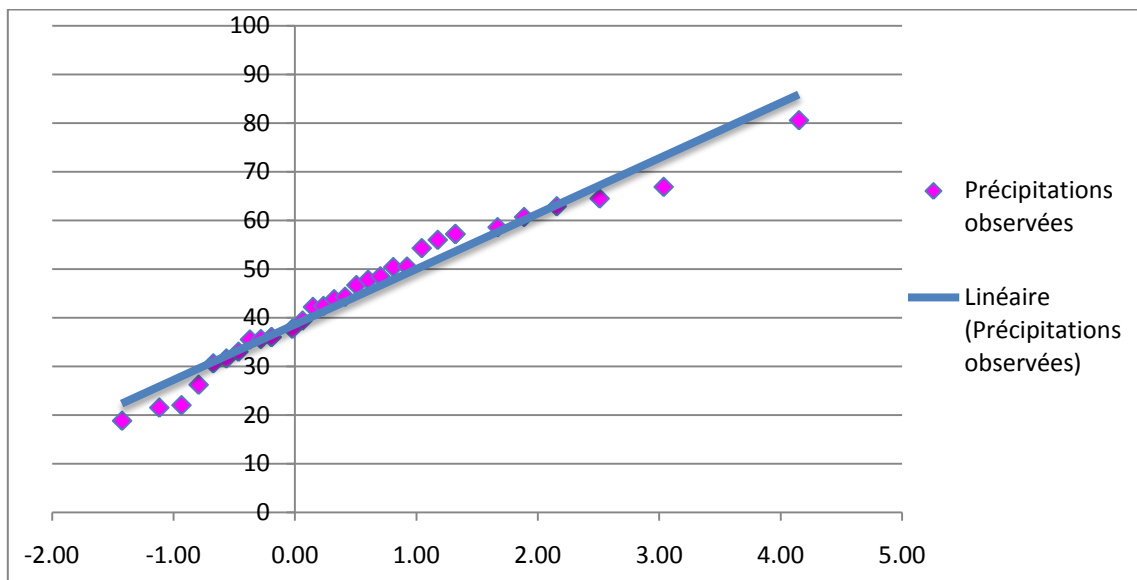


Fig.11 : Ajustement par la loi de Gumbel des Pj max de la station d'Imi miki

Tableau 8 : Pluies maximales journalières par période de retour

période de retour T	2	5	10	20	50	100	500	1000
probabilité de non dépassement de P	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	0.998	0.999
variable réduite de Gumbel	0.37	1.50	2.25	2.97	3.90	4.60	6.21	6.91
P pour période de retour T	42.6	55.4	64.0	72.1	82.7	90.6	108.9	116.8

IV) Estimation des débits de pointe

IV.1.Débits estimés par les méthodes empiriques

Les méthodes de calcul recensées en utilisant différentes formules empiriques tiennent compte de deux facteurs essentiels :

- Le gradient topographique du bassin versant, par le biais de sa pente ou de sa dénivelée.
- La taille du bassin versant, par le biais de sa surface et/ou de sa longueur.

Les débits retenus sont ceux calculés par ces formules dont les limites de validités dépendent essentiellement de la taille des bassins.

Formule de Mallet Gautier (BV > 100km²)

$$Q_t = 2 \times k \times \log_{10}(1 + aH) \times \frac{A}{\sqrt{L}} \times \sqrt{1 + 4 \times \log_{10} T - \log_{10} A}$$

Q(T) : Débit de pointe en m³/s pour la période de retour ;
 L : longueur du plus long talweg (km) ;
 A : superficie du bassin versant ;
 H : Pluie moyenne annuelle ; (**P=300mm**)
 a : Coefficient variant de 20 à 30 (au Maroc, on prend **a = 20**) ;
 K : Coefficient variant de 0,50 à 6,00 (au Maroc, on prend **k = 2**)

Formule de Fuller II

$$Q_t = (1 + a * \log(T)) * (S^{0.8} + 8/3 * S^{0.5}) * 4/3 * N / 100$$

Q_t : Débit de pointe en m³/s de récurrence T.
 T : Période de retour égale à (10, 20, 50 et 100 ans).
 a : Coefficient variant entre 0,7 et 0,8 au Maroc. Nous adoptons **a = 0,8**.
 S : Superficie du bassin versant en Km².
 N : Coefficient régional pris égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en montagne.
 Nous prenons **N = 85**.

Formule de HAZAN - LAZAREVICK

Elle permet d'évaluer le débit de pointe de la crue millénaire :

$$Q_t(1000) = k1 * S^{k2}$$

Où : Q (1000) = Débit de pointe en m³/s de récurrence 1000 ans
 S = Superficie du bassin versant en km².

Les valeurs des paramètres K1 et K2 dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie moyenne annuelle (voir tableau annexe 2). En nous basant sur la géographie et la pluviométrie de la zone d'étude, nous prenons les coefficients qui s'en approchent le plus :

$$k1=9.38 \quad k2=0.742$$

La transposition des débits des crues millénales aux débits de récurrence T se fera par la formule du **Fuller I** qui s'écrit comme suit :

$$Q_t(T) = Q(1000) * (1 + a * \log(T)) / (1 + a * \log(1000))$$

Q (T) : Débit de pointe en m³/s de récurrence T.
 a : Coefficient régional variant de 0,8 à 2 pour la partie nord du Maroc, 2 à 3,5 pour le Rif Occidental. Nous prenons **a = 2**

Les résultats des différentes formules régionales décrits dans le tableau 9:

Tableau 9 : Résultats des débits de pointe par les formules empiriques

	Débits m ³ /s		
	Mallet Gautier	Fuller II	Hazan Lazarevick
Q(10)	11.09	391.99	380.18
Q(20)	11.45	444.44	456.48
Q(50)	11.77	513.77	557.34
Q(100)	11.96	566.21	633.63
Q(1000)	-	-	887.09

Les débits calculés par la méthode de Fuller II et Hazan Lazarevick donnent des résultats similaires, tandis que ceux calculés par Mallet Gauthier donnent des valeurs sous-estimées que l'on ne va pas retenir.

IV.2.Ajustement des débits maximums instantanés

Cette méthode est basée sur autant de données que l'on a d'années à disposition des débits instantanés maximums annuels. Dans le cas de notre zone d'étude, on va ajuster par les débits de la station hydrologique de Tamri, qui est très proche du bassin versant de Tamraght, en vue qu'elle représente les mêmes caractéristiques climatiques que notre zone.

Le rapport entre les débits maximums journaliers et les débits maximums instantanés de la station de Tamri sont donnés dans le tableau en annexe 1 permettant de définir le coefficient de pointe.

Ces données ont été, tout d'abord, actualisées jusqu'à l'année 2014, par le logiciel de base de données des ressources en eau BADRE21, puis ajustées à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS par plusieurs modèles probabilistes, pour en retenir le meilleur.

La série des débits enregistrés a été ajustée avec les lois suivantes : Galton, Gumbel, Fréchet, Gamma. Pour chaque loi, nous obtenons un tableau récapitulatif des paramètres statistiques. La loi retenue est celle qui donne le meilleur ajustement sur la base du test khi-deux χ^2 .

La loi de Gamma est celle qui s'ajuste le mieux à notre échantillon. Les valeurs de débit résultant de cet ajustement ainsi que sa représentation graphique sont données dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Résultats de l'ajustement des débits de crues en période de retour par la loi de Gamma

Période de retour T	2	5	10	20	50	100	1000
Probabilité de non dépassement de Qp	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99	1.00
Qp pour période de retour T	252	566	801	1030	1340	1540	2340

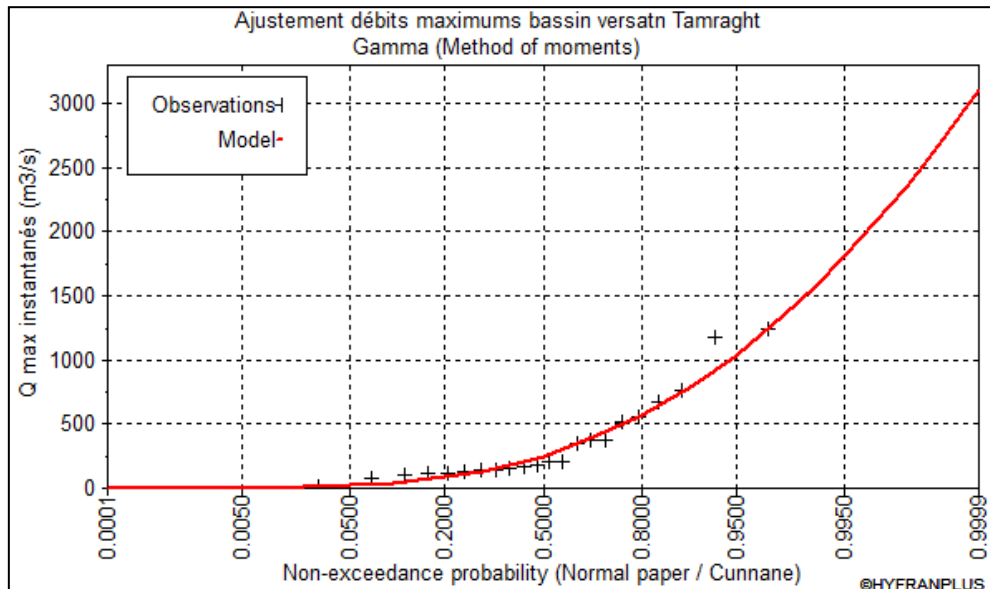


Fig.12 : Résultats de l'ajustement par la loi de Gamma

IV.3. Transposition à partir des bassins limitrophes

Afin de pouvoir mieux apprécier les débits de pointes probables sur le bassin versant obtenu par les formules empiriques et par ajustement, l'estimation des débits est également faite par analogie avec d'autres bassins versants similaires. Les critères de ressemblance sont essentiellement la morphologie et le régime pluviométrique.

La station hydrologique précitée est la plus proche de la zone d'étude et dispose d'un historique suffisant pour faire l'objet d'ajustements statistiques.

La transposition des débits des crues déterminées par ajustement à la station hydrologique voisine, vers le bassin versant de la zone de l'étude se fait grâce à la formule de Francou-Rodier communément utilisée au Maroc. Cette formule s'écrit sous la forme suivante :

$$Q_P = 10^6 \cdot \left(\frac{S}{10^8} \right)^{1 - \frac{K}{10}}$$

Qp = Débit de pointe m³/s au bassin cible

S = Surface du bassin cible en km²

K = Paramètre de Francou-Rodier

Le paramètre K est déterminé grâce à la surface active du bassin d'origine ($S'=1741$) en km^2 , selon la formule suivante :

$$K=10 \cdot \frac{\text{Log}(S'/100Q'_P)}{\text{Log}(S'/10^8)}$$

Les valeurs du coefficient K ainsi déterminées permettent de transposer les débits des crues aux bassins actifs cibles. On a synthétisé les valeurs du coefficient k, à partir des ajustements de la loi Gamma, (la mieux adaptée au contexte hydrologique local), aux séries des débits maximaux instantanés annuels de la station de Tamri.

Les valeurs des débits des crues pour le bassin de référence, ainsi que les paramètres K de Francou-Rodier, sont données, en m^3/s , dans le tableau 11 :

Tableau 11 : Débits, coefficients de Franco-Rodier pour la station hydrologique voisine de Tamri

Période de retour	10	20	50	100	1000
Q'p (débit de référence)	801	1030	1340	1540	2340
K	3.49	3.72	3.96	4.09	4.47
Qp (débit de pointe)	337	447	600	701	1121

IV.4.Méthode du Gradex

Cette approche vise la reconnaissance des crues de projet par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue. L'étude des crues a été réalisée grâce à l'utilisation de la méthode du Gradex permettant d'atteindre deux objectifs principaux :

- L'estimation des débits de pointe (Q_p) à l'exutoire du bassin versant étudié, pour des périodes de retour allant de 10 à 1000 ans ;
- La détermination de la forme de l'hydrogramme des crues et l'estimation des volumes de crues.

La méthode du Gradex, a donc pour but de rechercher les débits maximaux de crues pour des fréquences d'apparition rares à très rares. Elle s'applique notamment lorsque l'on dispose d'une longue série de pluie sur le bassin, permettant ainsi de valoriser au maximum l'ensemble des données disponibles. De manière générale, on dispose souvent de plus d'informations pluviométriques (Meylan et Musy, 1999). Cette méthode introduite par Guillot et Duband (1967) depuis, elle est utilisée par plusieurs auteurs tels que Naghettini et al (1996).

La conduite de la méthode du Gradex est comme suit :

- Ajustement par la loi de Gumbel des pluies maximales journalières et détermination, des $P_{jmax}(T)$ pour T allant de 2 à 1000 ans.
- Détermination du gradex journalier ($G_p(24)$).
- Calcul du Gradex des pluies sur le temps de concentration $G_p(T_c)$ à partir du Gradex des pluies en 24 heures.
- Calcul du débit de pointe de référence Q_p (T période de retour décennale).
- Calcul des débits de pointe et des lames d'eau ruisselées pour chaque période de retour par la méthode du Gradex.

– Données hydrologiques existantes

Une série d'observation de 32 ans de la station Imi Miki, représentant les précipitations journalières maximales, a été ajustées par la loi de Gumbel dans la partie III (Etude fréquentielle des pluies), (Tab.8). Cet ajustement nous a permis d'estimer les valeurs des précipitations, ainsi que le Gradex moyen.

Tableau 12 : Pluies maximales journalières par période de retour

Gradex	2	5	10	20	50	100	500	1000
11.3	42.6	55.4	64.0	72.1	82.7	90.6	108.9	116.8

Les valeurs représentées dans le tableau ci-dessus, correspondent à des valeurs journalières. Le passage aux pluies en 24 heures se fera en multipliant les valeurs par un coefficient égal à 1,15 et ceci pour tenir compte des erreurs systématiques dans la mesure. La valeur de Gradex doit aussi être changée avec la multiplication de Gradex des pluies journalières par le même coefficient de 1.15.

Tableau 13 : Pluies maximales journalières en 24 heures

Gradex	2	5	10	20	50	100	500	1000
12.99	49	63.7	73.6	82.9	95.1	104.2	125.2	134.3

– Estimation du débit de référence (T 10 ans)

Afin de calculer les débits des crues pour différentes fréquences de retours, par la méthode du Gradex, il est nécessaire au préalable de figer le débit décennal (pivot de la méthode du Gradex).

L'examen des débits décennaux déterminés par ajustement, transposition, ou calculés par les formules empiriques, montre que :

- Les débits calculés par les formules empiriques de Fuller II et Hazan Lazarevick sont comparables à ceux déduit par transposition à partir de la station de Tamri.
- L'ajustement des débits de la station Tamri est très surestimé et ne peut être retenu.

Donc, retiendrons-nous la moyenne des débits des formules empiriques et de la transposition à partir de la station de Tamri. Le débit de référence estimé est **Qp(10)= 369.7 m3/s**.

– Calcul de la lame d'eau ruisselée et du volume d'eau pour la fréquence 10 ans

- **Calcul de volume V (Tr=10)**

Le volume V (Tr = 10) correspondant au débit de référence (Tr = 10) peut être calculé par multiplication de débit de pointe de référence fois le temps de concentration :

$$V(\text{Tr} = 10) = Q_p(\text{Tr} = 10) \times T_c$$

- **Calcul de la lame d'eau ruisselée Lr (Tr=10)**

Lr (Tr=10) est la lame d'eau ruisselée de référence. Elle est déduite du volume de référence V(Tr= 10) en divisant ce dernier par la superficie du bassin versant.

$$L_r(\text{Tr} = 10) = \frac{V}{S_{bv}}$$

– Calcul de la lame d'eau ruisselée et Qp pour différentes fréquences

Les lames d'eau ruisselées Lr (T, Tc) au bassin étudié, sur le temps de concentration et pour différentes périodes de retour, sont obtenues en utilisant l'équation ci-dessous:

$$L_r(T, T_c) = L_r(\text{Tr}, T_c) + G_p(T_c) \times (U(T) - U(\text{Tr}))$$

Avec : $U(T) = -\ln(-\ln(1-1/T))$ est la variable de Gumbel

Lr (Tr, Tc) est la lame d'eau ruisselée de référence

Gp(Tc) est le Gradex sur le temps de concentration calculé à partir du Gradex en 24 heures par la formule suivante :

$$G_p(T_c) = G_p(24) \times \left(\frac{T_c}{24}\right)^{(1-b)}$$

b est le coefficient de Montana pris égal à 0.38.

A partir de la lame d'eau ruisselée, on a pu déduire le volume de la crue en la multipliant par la superficie totale du bassin versant, ainsi que le débit de pointe pour différentes période de retour (Tab.14).

Tableau 14 : Débits, lames d'eau ruisselées et volumes d'eaux pour différentes période de retour par la méthode du Gradex

Période de retour (ans)	10	20	50	100	1000
Lame d'eau ruisselée (mm)	46.3	53.6	62.98	70.03	93.3
Volume d'eau (mm ³)	21.3	24.64	28.97	32.21	42.94
Débits (m ³ /s)	369.7	427.8	502.9	559.3	745.4

Conclusion

L'étude hydrologique menée par application de plusieurs méthodes de calcul des débits, a permis leur estimation pour des périodes de retour allant de 10 à 1000ans. Les débits retenus sont le fruit d'une analyse et une comparaison des débits calculés par les différentes méthodes présentées précédemment. Les débits calculés par les formules empiriques de Fuller II et Hazan-Lazarevick sont plus faibles que ceux déterminés par transposition mais restent comparables à ceux calculés par la méthode du Gradex. Tandis que les débits calculés par Mallet Gauthier sont sous-estimés que l'on ne va pas retenir, ainsi ceux calculés par Ajustement qui sont surestimés. Aussi, retiendrons-nous la moyenne des débits calculés par les formules empiriques et ceux calculés par la méthode du Gradex. Le tableau ci-dessous, résume les différents débits obtenus et ceux retenus :

Tableau 15 : Débits obtenus et retenus de différentes méthodes

		Périodes de retour			
		10	20	50	100
Débits obtenus	Mallet Gautier	11.09	11.45	11.77	11.96
	Fuller II	391.99	444.44	513.77	566.21
	Hazan Lazarevick	380.18	456.48	557.34	633.63
	Ajustement Loi Gamma	801	1030	1340	1540
	Transposition	337	447	600	701
	Gradex	369.7	427.8	502.9	559.3
Débits retenus		370	443	525	586

Chapitre IV : Etude hydraulique

Introduction

L'étude hydraulique consiste à faire le diagnostic de la zone d'étude pour tout événement hydraulique. Elle consiste à évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels que la géométrie, le débit, et les conditions aux limites dans le but de réaliser un modèle hydraulique pour calculer la hauteur d'eau, d'une part, et d'autre part pour déterminer les zones de débordement.

L'analyse hydraulique pour l'établissement des zones inondables, s'est basée sur la modélisation hydraulique de la propagation de l'onde de crue le long de l'oued par l'utilisation du logiciel HEC-RAS, développé par « Hydrologic Engineering Center (HEC) » comme outil de simulation, ainsi que le logiciel Auto CAD pour représenter les zones inondables.

1) Diagnostic de la situation actuelle

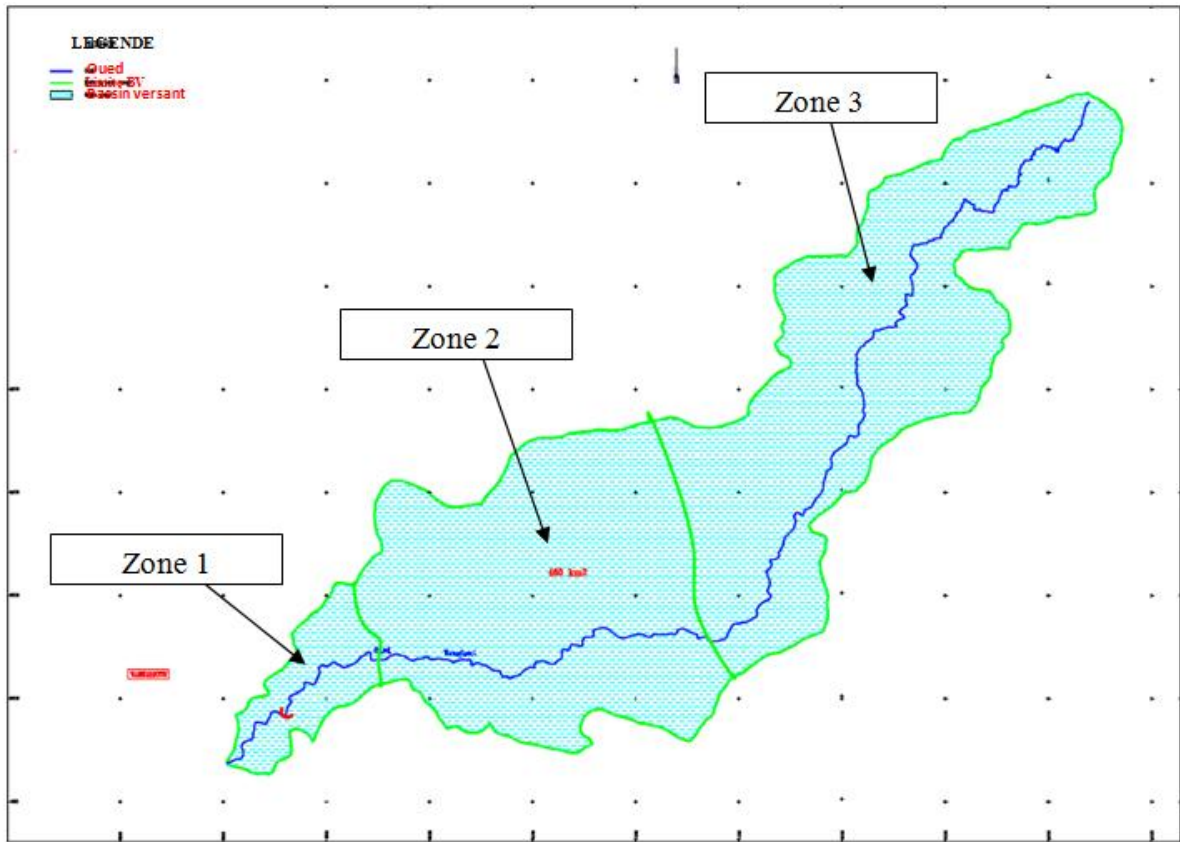
Le diagnostic de la situation existante a permis de comprendre la problématique posée par les crues de l'oued Tamraght et déterminer les points noirs et zones inondables (Fig.13) :

Zone 1 : Zone urbaine au niveau de l'ouvrage d'art OA1 (pont sur la route nationale RN1 liant la ville d'Essaouira et la ville d'Agadir). Elle enregistre un débordement de crues sur la rive gauche et se situe entre les points coordonnées (X=91168 ; Y=397817) et (X=90151 ; Y=396837).

Zone 2 : Le Douar Assirne borne la rive droite de l'oued Tamraght. Ce douar se trouve isolé pendant les périodes de crues ainsi que d'autres douars du fait que la piste qui les relie à la route communale RC08 passe par le lit de l'oued Tamraght. Par ailleurs, quelques constructions du Douar Assirne sont atteintes par les inondations du fait qu'elles sont plus ou moins proches de la rive droite de l'oued, et se situe entre les points coordonnées (X = 92232 ; Y = 399045) et (X = 92144 ; Y = 398817) sur une longueur totale d'environ 300 m.

Zone 3 : Le Douar Tamarout est limité par la rive gauche de l'oued Tamraght qui s'écoule dans le sens Est-Ouest. Lors des périodes pluvieuses, les eaux de crues acheminées par ce cours d'eau inondent les parcelles agricoles des bananiers et peuvent également atteindre les constructions du douar.

La zone inondable se situe entre les points coordonnées : (X = 94218 ; Y = 400714) et (X = 94301 ; Y = 400135) sur une longueur totale d'environ 1.3 km



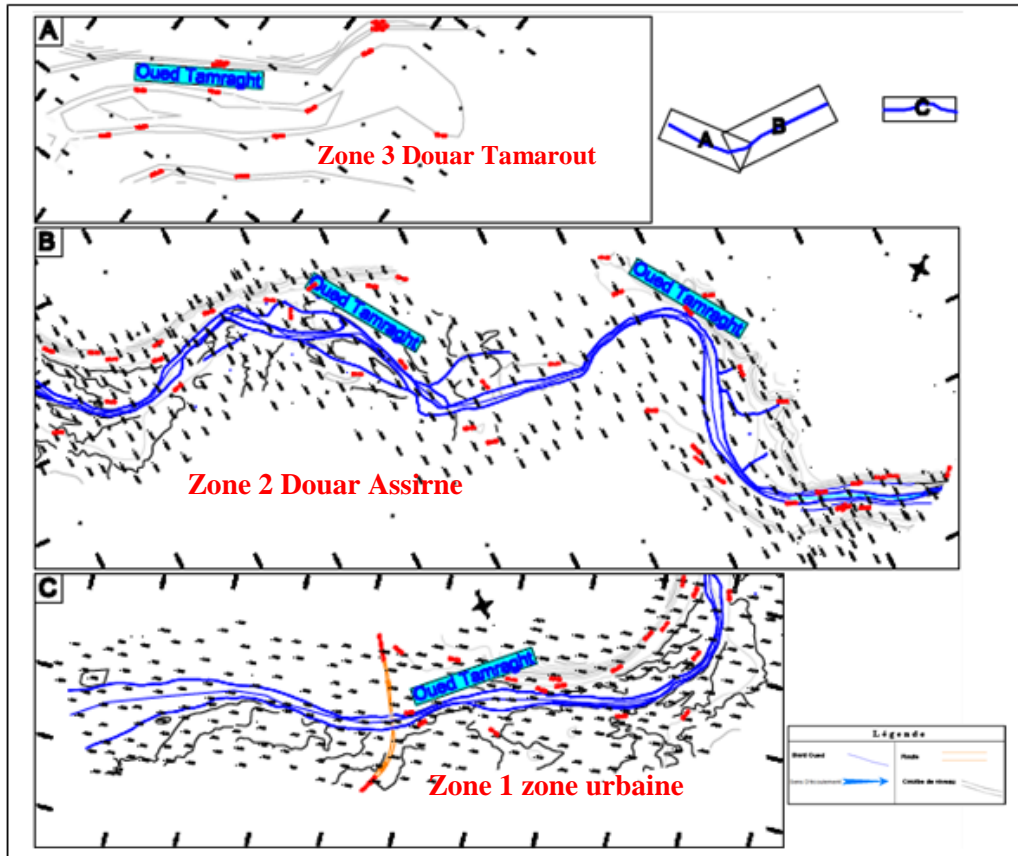


Fig.13 : Plan de diagnostic de l'état actuel (Extraite de l'Autocad)

II) Reconstitution de la géométrie du cours d'eau

Pour la réalisation des simulations hydrauliques et la délimitation de l'étendu des zones susceptibles d'être inondées au passage des crues des différentes périodes de retours, on a monté un modèle hydraulique pour chaque tronçon du cours d'eau principal.

Le principe de la reconstitution de la géométrie de l'oued est basé sur l'établissement des profils en travers qui doivent être perpendiculaires au sens de l'écoulement. La modélisation a porté sur le tronçon s'étendant entre le point des coordonnées (X=93919m ; Y=400744 ; Z=64.22) et l'embouchure. Sur ce tronçon de longueur, 33 profils en travers ont été relevés. (Fig.14).

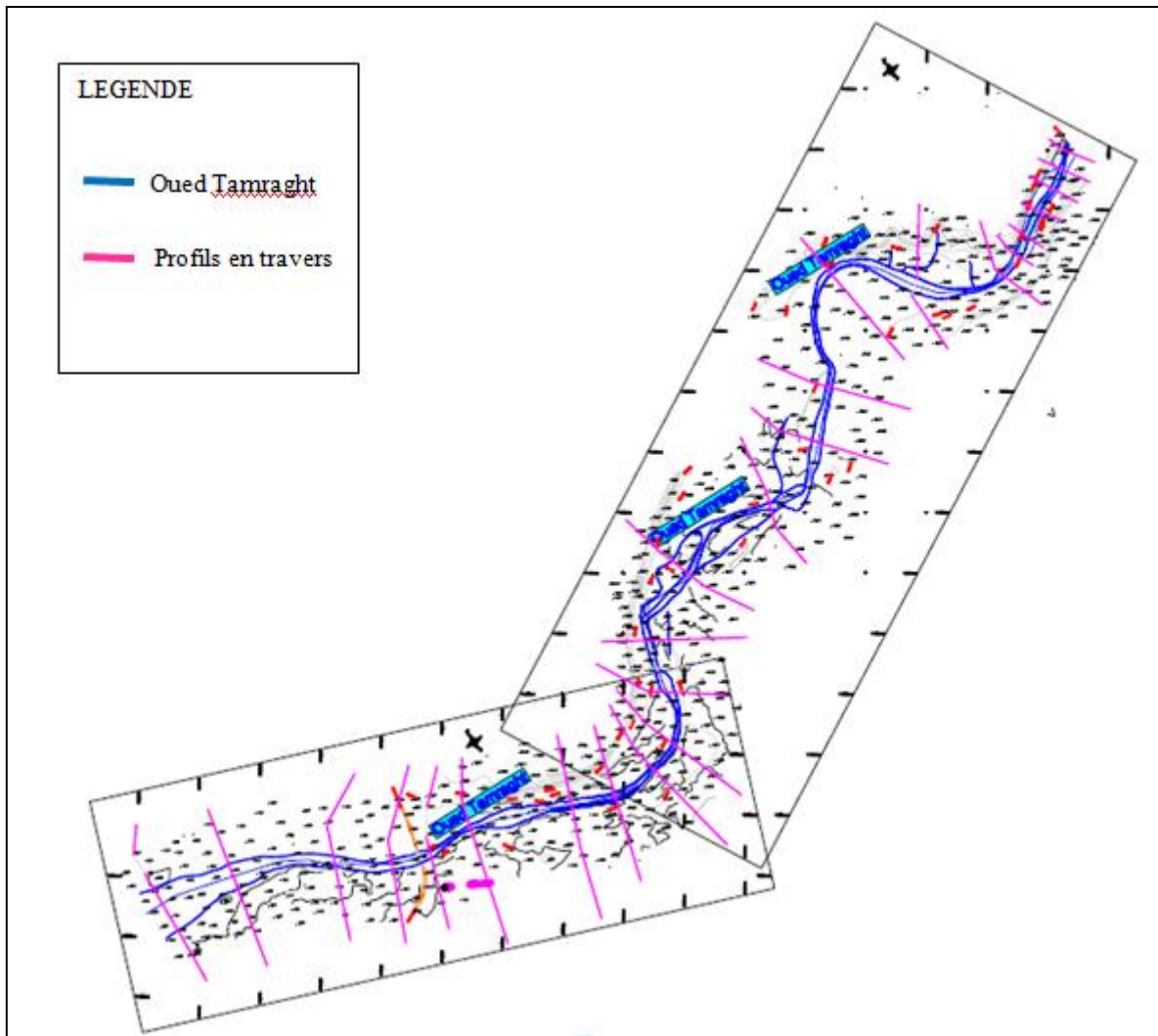


Fig.14 : Topographie de l'oued Tamarght et profils en travers (AUTOCAD)

La densité et l'implantation des profils en travers à établir sont choisies de manière à se rapprocher au mieux des conditions réelles de l'oued du point de vue topographique et hydraulique. Ainsi, les profils ont été choisis au niveau des :

- Resserrements topographiques. Dans le cas de resserrement sur une section de longueur importante les profils sont implantés à l'amont et à l'aval de cette section.
- Zones larges de la vallée de l'oued.
- Méandres.
- Ouvrages de franchissement.

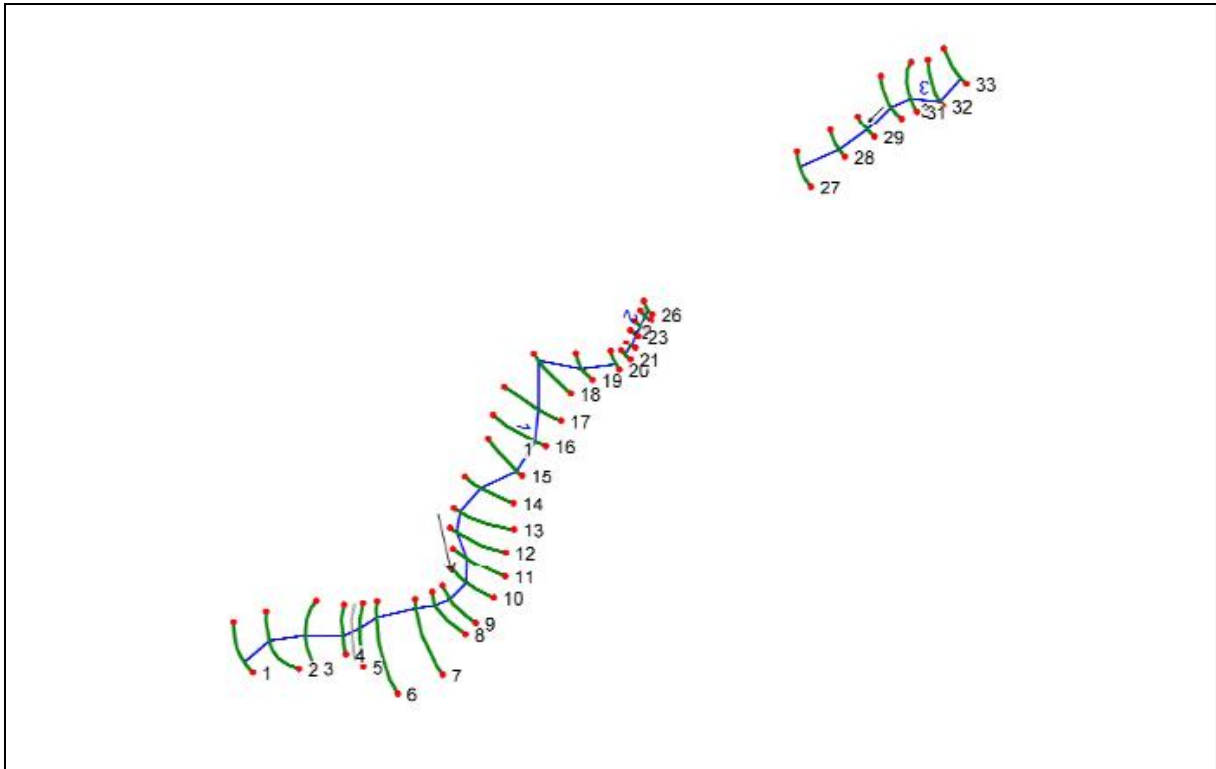


Fig.15 : Résultats de la géométrie du cours d'eau par HEC-RAS

III) Modélisation hydraulique

III.1.Modélisation

Pour un événement hydrologique donné, le modèle numérique calcule en chaque point préalablement défini, le niveau, le débit et la vitesse de l'écoulement.

Comme dans toute démarche de calcul numérique, il y a trois phases qu'il a fallu respecter :

- Construction du modèle ;
- Ajustement des paramètres variables afin de faire correspondre au mieux les résultats du calcul avec les observations du terrain ;
- Etablir des tests de sensibilité permettant de se faire une idée sur la validité du réglage et sur les conditions aux limites.

III.2.Outils de modélisation

Pour les besoins de cette étude, on a utilisé le modèle HEC-RAS (4.1.0), qui est un logiciel d'analyses hydrauliques désigné à modéliser les écoulements à surface libre dans les canaux naturels et artificiels avec la prise en compte des ouvrages de franchissement. Il permet de simuler les écoulements graduellement variés en régime transitoire et d'effectuer les calculs de lignes d'eau en régime dynamique en simulant les différents obstacles le long du cours d'eau. La modélisation de l'Oued se base sur les profils en travers, tient compte de

tous les ouvrages existant, et permet de définir différents coefficients de rugosité pour chaque section. (U.S. Army Corps of Engineers. (2008)).

Données d'entrée :

- La topographie des profils en travers du cours d'eau ;
- Les distances entre les profils ;
- Le coefficient de Manning ;
- Les conditions limites (amont et aval) ;

Les résultats des calculs :

- Les niveaux d'eau et d'énergie dans chaque profil en travers ;
- Les vitesses d'écoulement dans chaque section ;
- Le profil en long dans le temps des lignes d'eau.

III.3.Construction du modèle

Sur la base des données retenues, le modèle du cours d'eau a été monté en se basant principalement sur les profils de la restitution et sur le MNT.

III.4.Débits et conditions aux limites

L'étape suivante de la modélisation hydraulique est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulements. Les débits utilisés ont été obtenus à partir de l'étude hydrologique précédemment réalisée et réaffichée dans le tableau suivant :

Tableau 16 : Débits des périodes de retour nécessaires à la modélisation

T (ans)	10	50	100
Q (m³/s)	370	525	586

Ces débits sont considérés constants le long du tronçon du fait que l'on négligera les apports latéraux et les infiltrations.

Le modèle est encadré par deux conditions aux limites amont et aval. Leur condition consiste à introduire une pente de l'oued qui conditionne la nature de l'écoulement. Dans notre cas, l'écoulement est considéré comme fluvial le long de l'Oued.

Au niveau de l'embouchure, l'oued évacue ses eaux vers l'océan atlantique, le niveau d'eau en aval sera donc égale à 0 m NGM.

III.5.Coefficient de rugosité

Les valeurs des coefficients de rugosité ont été déterminées sur la base des observations de terrain, et également en se basant sur l'expérience de l'ingénieur conseil dans ce domaine

et sur sa bonne connaissance des conditions géologiques et géotechniques pour avoir réalisé plusieurs études de modélisations de cours d'eau.

- Le coefficient ainsi choisi dans le cas de la présente étude est de **0.030** dans le lit de l'oued avec une granulométrie assez fine sablo limoneuse et **0.035** sur les rives couvertes et les terrasses agricoles.

IV) Visualisation et discussion des résultats

La saisie des données géométriques concernant les profils des sections transversales et les débits de pointe de différentes période de retour, ainsi que les conditions limites dans le logiciel HEC-RAS ont permis d'effectuer les calculs et d'extraire des résultats comme :

- la vue en profil du tronçon simulée,
- le niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils,
- une vue de trois dimensions du niveau d'eau dans le tronçon d'étude des tables descriptives
- la courbe de tarage.

IV.1.Ligne d'eau

La ligne d'eau représente une vue en profile du tronçon d'étude avec le niveau et la surface d'eau de l'oued et le niveau d'eau de chaque période de retour. Dans le cas de cette étude, la différence entre les niveaux des périodes de retour est bien visible. Le comportement des crues est sensible aux irrégularités de la topographie.

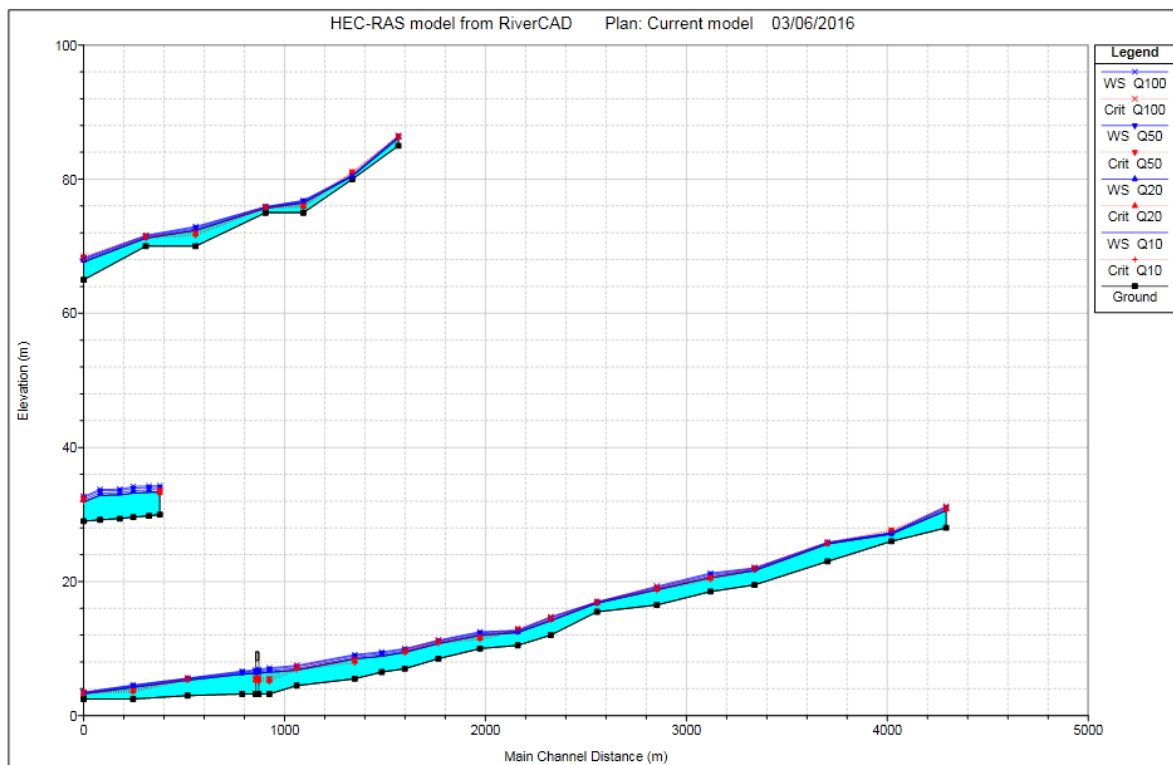


Fig.16 : Ligne d'eau des tronçons modélisés de l'Oued Tamraght

IV.2. Visualisation en trois Dimension du tronçon modélisé

HEC-RAS fournit une vue en trois dimensions qui facilite le suivi du comportement des eaux de crue de période de retour (Fig.17). Cette figure montre que l'oued Tamraght déborde pour toutes les périodes de retour (10, 20, 50, 100ans) . Ce débordement touche le centre d'Aourir.

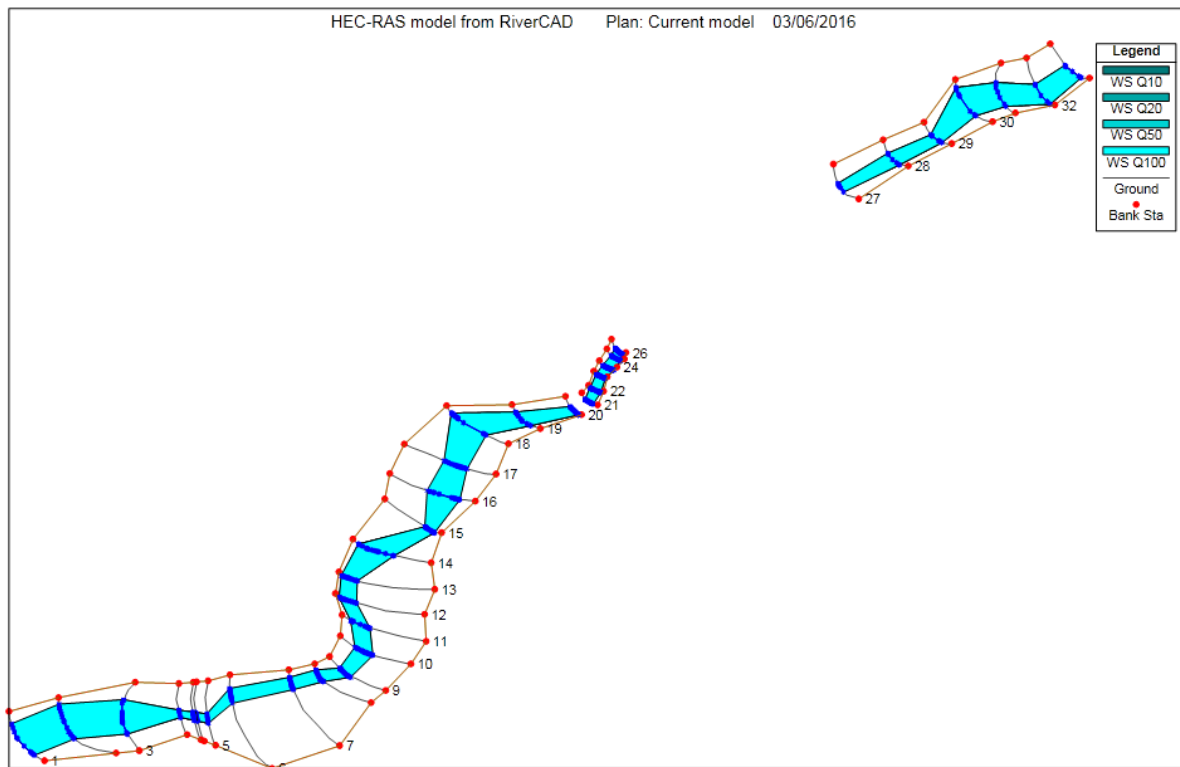


Fig.17 : Vue (X, Y, Z) du tronçon modélisé

IV.3.Vitesse d'écoulement

La figure 18 représente la variation de vitesse d'écoulement des eaux pour chaque période de retour.

On observe presque la même allure pour tous les niveaux d'eau. La vitesse augmente avec le niveau d'eau. La variation de vitesse est fonction de la topographie de terrain.

Les vitesses moyennes à niveau d'eau maximal restent normalement inférieures à 4 m/s. Au moment de la montée de la crue et dans certains profils qui présentent des étranglements et rétrécissements, les vitesses sont relativement élevées et varient généralement entre 4 et 7 m/s provoquant de la sorte des affouillements en raison des fortes vitesses.

La vitesse d'écoulement influence directement sur l'importance de l'érosion et la quantité de volume transporté par les eaux de crue ainsi que la force de pénétration des eaux dans les domaines urbains et leur destruction.



Fig.18 : Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance à partir de l'exutoire

IV.4. Restitution de la courbe de tarage

Le logiciel HEC-RAS a permis de fournir une représentation de la variation de la hauteur d'eau en (m) en fonction de débit m³/s (fig.19).

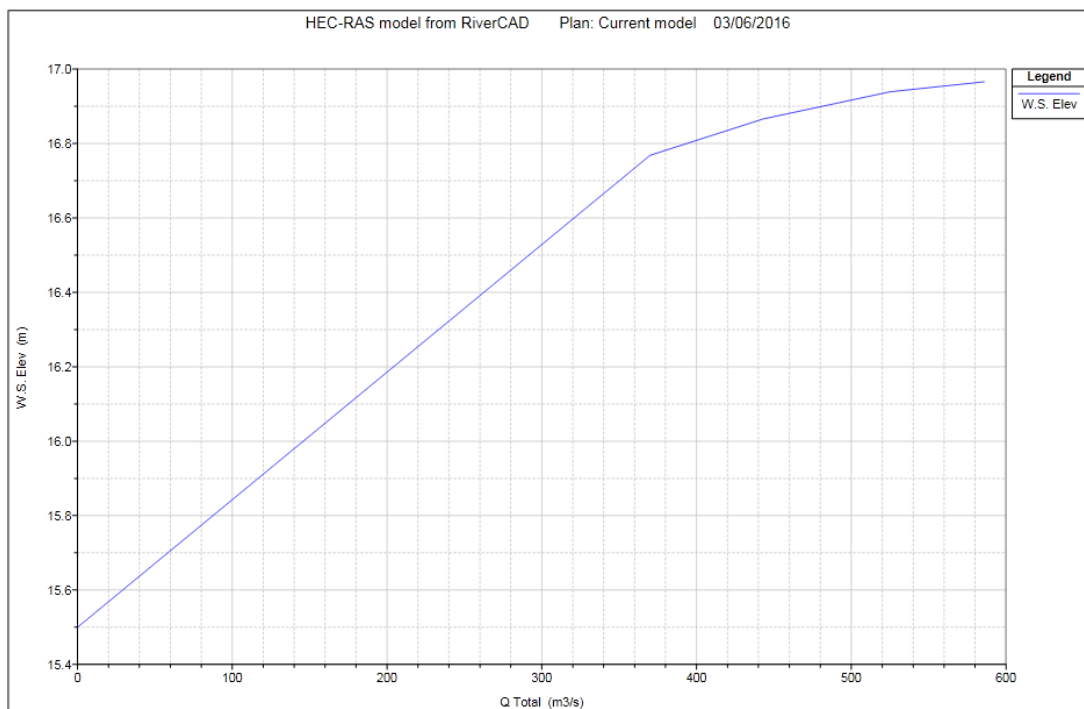


Fig.19 : Courbes de tarage obtenu à partir de HEC-RAS

Le graphique (Fig.19) représente la courbe de tarage décrivant la relation expérimentale entre les hauteurs d'eau et les débits correspondants d'un cours d'eau. La courbe reliant les points expérimentaux apparaît généralement linéaire pour les hauteurs fortes et moyennes ; en absence d'équation mathématique la représentant fidèlement, la relation est utilisée sous sa forme graphique.

Les causes d'instabilité de la relation hauteur-débit sont multiples : évolution du fond meuble, développement de la végétation aquatique, couche de glace en amont ou en aval de la section de mesure, accumulation de débris.

IV.5. Simulation des crues de différentes périodes de retour

Les résultats des différents calculs et simulations hydrauliques effectués sont donnés pour chaque cours d'eau sous trois formes :

- Tableaux récapitulatifs des résultats de l'oued;
- Graphiques montrant les niveaux d'eau atteints au droit des profils en travers de l'oued (Annexe4);
- Vue en plan du modèle hydraulique sur lequel sont reportées les limites atteintes des crues simulées de l'oued.

Pour chaque débit de crue simulé, la valorisation des nombreux résultats produits par l'étude passe par une mise en forme adaptée aux différents indicateurs calculés et aux objectifs visés. Cette mise en forme comprend des tableaux et des graphiques permettant de comparer visuellement les résultats.

Les tableaux des résultats récapitulent quelques facteurs caractérisant les régimes d'écoulement. Ainsi, pour chaque section de calcul sont donnés les paramètres suivants :

- Le débit maximum transitant par la section.
- La côte minimale de la section qui renseigne sur la pente naturelle du lit de l'oued.
- La côte maximale atteinte par l'eau au passage de la crue. Ces côtes permettent de cartographier les zones inondées et d'identifier les ouvrages qui présentent des débordements.
- La côte critique de la ligne d'eau à l'amont des ouvrages de franchissement.
- La pente moyenne de la ligne d'eau.
- La Vitesse maximum de l'écoulement.
- Les sections mouillées et la largeur au miroir.

- Le nombre de Froude.

Tableau 17 : Exemple des tableaux des résultats par HEC-RAS

HEC-RAS Plan: Current mode River: 1 Reach: 1

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
1	20	Q10	370.00	28.00	30.60	30.61	31.39	0.007722	3.93	94.03	60.08	1.00
1	20	Q20	443.00	28.00	30.83	30.83	31.68	0.007484	4.09	108.28	63.72	1.00
1	20	Q50	525.00	28.00	31.06	31.06	31.98	0.007394	4.27	122.99	67.27	1.01
1	20	Q100	586.00	28.00	31.21	31.22	32.19	0.007278	4.38	133.87	69.67	1.01
1	19	Q10	370.00	26.00	27.09	27.36	28.00	0.023354	4.23	87.57	115.90	1.55
1	19	Q20	443.00	26.00	27.16	27.49	28.25	0.025254	4.62	95.94	117.85	1.63
1	19	Q50	525.00	26.00	27.24	27.63	28.51	0.026725	4.99	105.18	119.93	1.70
1	19	Q100	586.00	26.00	27.29	27.72	28.70	0.027795	5.25	111.56	121.35	1.75
1	18	Q10	370.00	23.00	25.61	25.61	25.95	0.010581	2.59	142.68	216.69	1.02
1	18	Q20	443.00	23.00	25.70	25.70	26.08	0.009914	2.72	162.88	219.28	1.01
1	18	Q50	525.00	23.00	25.78	25.79	26.21	0.009939	2.90	180.96	221.57	1.02
1	18	Q100	586.00	23.00	25.85	25.85	26.30	0.009416	2.97	197.18	223.61	1.01
1	17	Q10	370.00	19.50	21.63	21.68	22.24	0.009723	3.47	106.69	98.32	1.06
1	17	Q20	443.00	19.50	21.77	21.85	22.45	0.009894	3.64	121.70	105.67	1.08
1	17	Q50	525.00	19.50	21.94	22.02	22.66	0.009770	3.77	139.27	113.66	1.09
1	17	Q100	586.00	19.50	22.05	22.15	22.80	0.009735	3.83	152.84	121.28	1.09
1	16	Q10	370.00	18.50	20.58	20.29	20.89	0.004427	2.47	149.71	127.10	0.73
1	16	Q20	443.00	18.50	20.84	20.45	21.13	0.003596	2.40	184.72	140.36	0.67
1	16	Q50	525.00	18.50	21.10	20.61	21.38	0.003065	2.36	222.73	154.07	0.63
1	16	Q100	586.00	18.50	21.27	20.71	21.55	0.002826	2.35	249.75	163.68	0.61
1	15	Q10	370.00	16.50	18.79	18.65	19.50	0.005875	3.72	99.34	56.04	0.89
1	15	Q20	443.00	16.50	18.94	18.87	19.80	0.006691	4.12	107.58	57.54	0.96
1	15	Q50	525.00	16.50	19.13	19.13	20.12	0.007100	4.43	118.60	59.47	1.00
1	15	Q100	586.00	16.50	19.30	19.30	20.35	0.006973	4.55	128.87	61.21	1.00
1	14	Q10	370.00	15.50	16.77	16.77	17.15	0.010022	2.74	135.14	181.72	1.01
1	14	Q20	443.00	15.50	16.87	16.87	17.29	0.009617	2.90	152.95	183.26	1.01
1	14	Q50	525.00	15.50	16.94	16.97	17.45	0.010294	3.16	166.36	184.41	1.06
1	14	Q100	586.00	15.50	16.97	17.04	17.56	0.011659	3.42	171.34	184.83	1.13

Les tableaux des résultats permettent de tracer les lignes d'eau sur les profils en long et les profils en travers qui ont servi dans les simulations ainsi que la présentation graphique sur plans des zones inondées.

V) Résultats du diagnostic hydraulique

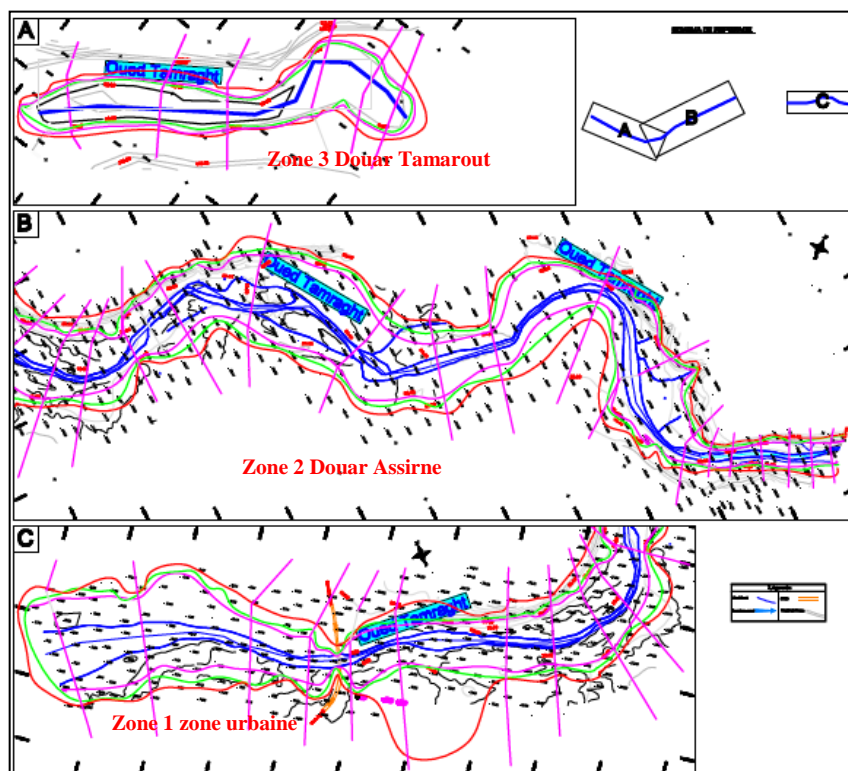
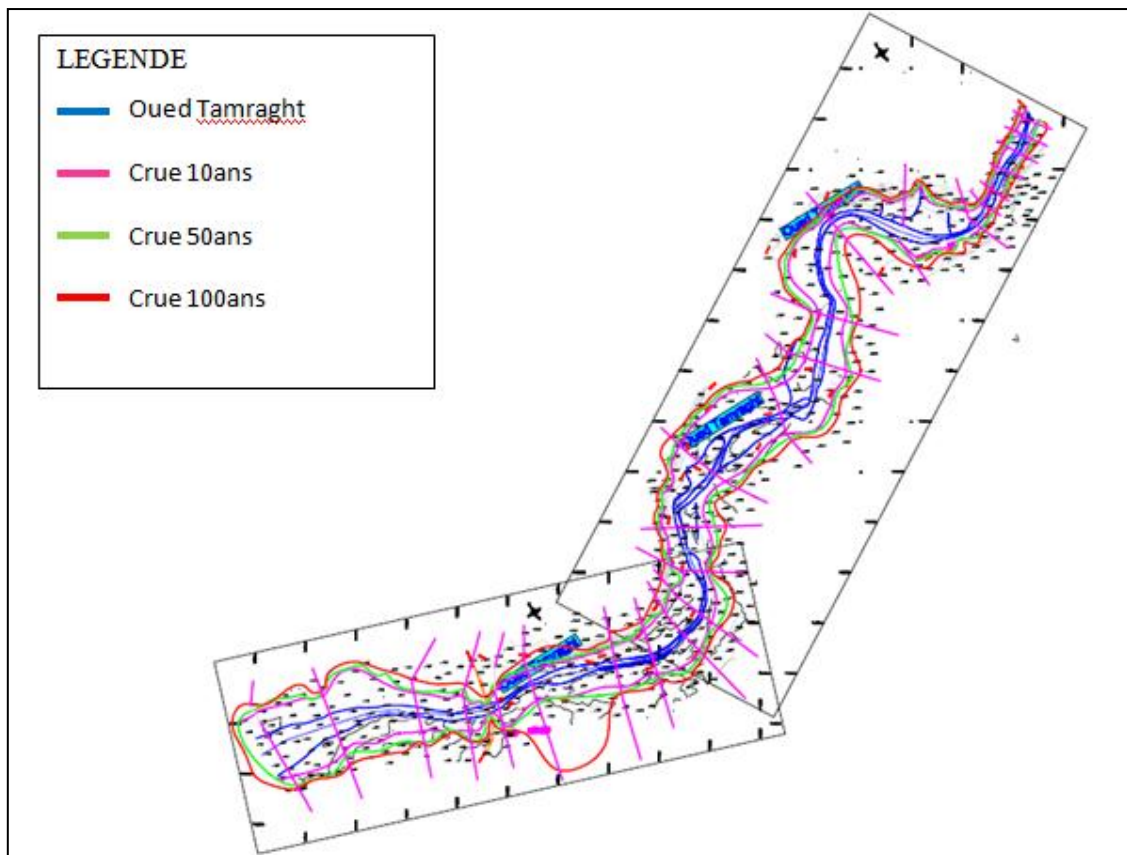


Fig.20 : Plan des zones inondables

Les calculs, vérifications et simulations hydrauliques ont confirmé les principales constatations faites lors du diagnostic des tronçons étudiés. Les principales constatations qui ressortent des résultats précités sont présentées ci-après :

- L'oued Tamraght déborde pour toutes les périodes de retour (10, 50, et 100 ans).
- Les vitesses moyennes à niveau d'eau maximal restent normalement inférieures à 4 m/s. Toutefois, au moment de la montée de la crue et dans certains profils qui présentent des étranglements et rétrécissements, les vitesses sont relativement élevées et varient généralement entre 4.00 et 8 m/s provoquant de la sorte des affouillements en raison des fortes vitesses.
- L'écoulement est très instable ; mis en évidence par le nombre de Froude qui fluctue autour de l'unité. Cette fluctuation est importante dans certain profils où il peut frôler une valeur de 2,8.
- Le douar Tamaroute se trouve exposé au danger des inondations puisque toutes les périodes de retour débordent sur une bonne partie des constructions et parcelles agricoles de cette localité.
- La route communale RC08 adjacente à la rive gauche de l'oued au niveau du douar Assirne connaît des débordements à grandes vitesses sur ce tronçon causant de la sorte une forte érosion détruisant cette voie.
- Quelques constructions ou blocs d'habitations de la zone urbaine côtoyant la RG de l'oued Tamraght dont l'écoulement mène vers l'ouvrage d'art OA1 se trouvent sur le lit ou à proximité de l'oued et sont touchées par la propagation des crues simulées.

VI) Définitions des schémas d'aménagements

Les schémas d'aménagement proposés, afin de remédier au phénomène des inondations et protéger la commune rurale d'Aourir, se présentent comme suit :

- Pour protéger le douar de Tamarout, on propose la réalisation d'une protection en gabions avec revêtements en béton en amont du douar de caractéristiques :
La continuité de la protection sera assurée via la réalisation d'un mur en maçonnerie s'étalant sur une longueur totale de 730 m.
- La route RC08 au niveau du douar Assirne sera protégée par la réalisation soit :
 - Variante V1 : D'une protection en gabionnage avec revêtements en béton.
 - Variante V2 : D'un mur en maçonnerie.

- La zone urbaine du centre Aourir ainsi que les parcelles agricoles côtoyant la rive gauche de l'oued Tamraght seront protégées par la réalisation soit :
 - Variante V1 : digue de protection.
 - Variante V2 : D'un mur en maçonnerie.
- Réalisation d'un ouvrage hydraulique de franchissement sur l'oued Tamraght, au niveau du douar Assirne afin d'éviter l'enclavement de la population locale lors de la période hivernale et assurer la continuité de la piste passant par le lit de l'oued et qui relie les douars à la route communale RC08.
- Par ailleurs, il convient de réaliser un reprofilage et recalibrage de l'oued Tamraght afin de débarrasser les débris de charriage.
- Pour atténuer le phénomène de charriage au niveau des bassins versants d'oued Tamraght, il est recommandé de réaliser des seuils de sédimentation à installer en amont de la zone d'étude. Néanmoins, l'efficacité de cet aménagement reste tributaire des opérations de curage qu'il faut entamer avant chaque saison hivernale.

Conclusion

Le diagnostic de la situation existante a permis de comprendre la problématique posée par les crues de l'oued Tamraght et déterminer les trois principales zones inondables. La modélisation des tronçons de l'oued par HEC-RAS, nous a permis de reconstruire la géométrie du cours d'eau en se basant sur des profils en travers, ainsi d'extraire différents résultats, à savoir la vue en profil du tronçon simulée, le niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils, une vue de trois dimensions du niveau d'eau dans le tronçon d'étude et les vitesses d'écoulement. Les résultats de simulation hydraulique nous ont permis de constater que l'oued déborde pour toutes les périodes de retour débordent sur une bonne partie des constructions et parcelles agricoles, ce qui confirme les constatations faites lors du diagnostic des tronçons de la zone d'étude, ainsi de définir les schémas d'aménagements projetés au niveau de l'Oued Tamraght, afin de remédier au phénomène des inondations et protéger la commune rurale d'Aourir.

Conclusion générale

Le bassin versant de l'Oued Tamraght s'allonge dans une direction NE-SW orthogonalement à la ligne de crête littorale du Haut Atlas bordier qu'il draine, traversant le centre d'Aourir. Sa géomorphologie est caractérisée par une prédominance des montagnes appartenant à la chaîne haute Atlasique et son couvert végétal est dominé par l'arganier.

L'étude climatique de notre zone d'étude est basée sur l'exploitation des données pluviométriques, de températures et de vents de la station Imimiki. Cette étude nous a permis de déceler un certains nombres de caractères climatiques. Les précipitations recueillies entre 1962 à 2015, sont différentes d'une année à l'autre, avec une moyenne annuelle de 327 mm, ainsi la saison pluvieuse s'étale d'octobre à mai avec d'importantes périodes de sécheresses. L'étude de la température montre que l'été est la saison la plus chaude alors l'hiver est la plus froide avec une moyenne qui oscille entre 13°C en janvier et 33°C en juillet-août. Quant au vent, la moyenne mensuelle des vitesses varie de 4.30 km/h en janvier et 9.64 km/h en mai. Le sens des vents est en général nord-ouest. Toutefois, durant la période juillet-août, le vent souffle du sud-est. Il s'agit du Chergui.

L'oued prend ses sources des calcaires jurassiques situés à l'amont du bassin versant du côté Est. Les cours d'eau entaillent ensuite des terrains crétacés qui forment le paysage dominant de ce bassin versant jusqu'à l'exutoire de l'oued vers l'océan Atlantique.

L'analyse des différents paramètres physiques et géomorphologiques a permis une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques du bassin versant étudié et par conséquent leur contribution dans la genèse des crues.

L'étude hydrologique menée par application de plusieurs méthodes de calcul des débits, a permis leur estimation pour des périodes de retour allant de 10 à 1000ans. Les débits retenus sont le fruit d'une analyse et une comparaison des débits calculés par les différentes méthodes présentées précédemment. Aussi, retiendrons-nous la moyenne des débits calculés par les formules empiriques et ceux calculés par la méthode du Gradex. Ces résultats constituent un document utile à la modélisation hydraulique qui permet le calcul de la propagation des crues dans les cours d'eau. En effet, l'étude hydrologique constitue le socle sur lequel se construisent toutes les modélisations.

Le diagnostic de la situation existante a permis de comprendre la problématique posée par les crues de l'oued Tamraght et déterminer les trois principales zones inondables. La modélisation des tronçons de l'oued par HEC-RAS, nous a permis de reconstruire la

géométrie du cours d'eau en se basant sur des profils en travers, ainsi d'extraire différents résultats, à savoir la vue en profil du tronçon simulée, le niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils, une vue de trois dimensions du niveau d'eau dans le tronçon d'étude et les vitesses d'écoulement. Les résultats de simulation hydraulique nous ont permis de constater que l'oued déborde pour toutes les périodes de retour sur une bonne partie des constructions et parcelles agricoles, ce qui confirme les constatations faites lors du diagnostic des tronçons de la zone d'étude, ainsi de définir les schémas d'aménagements projetés au niveau de l'Oued Tamraght, afin de remédier au phénomène des inondations et protéger la commune rurale d'Aourir.

Références bibliographiques

- ABHSMD, 2007**, Etude de protection contre les inondations, Mission 1.1, Etude d'Avant Projet Détaillé de la solution retenue, Province d'Agadir, préfecture d'Agadir Ida Outanane, centre d'Aourir.
- ABHSMD, 2007**, Etude de protection contre les inondations, Mission 1.2, Etude hydrologique et hydraulique et définition des schémas d'aménagement, Province d'Agadir préfecture d'Agadir Ida Outanane, centre d'Aourir.
- ABHSMD, 2014**, Etude du schéma directeur du système de mesure des ressources en eau dans le bassin de Souss Massa et du Draa. Mission1, Investigation préliminaire et diagnostic de la situation actuelle des bassins de Souss-Tamri-Tamraght.
- ABHSMD, 2016**, Etude de protection contre les inondations, Mission 1, Diagnostic de la situation actuelle, Province d'Agadir, préfecture d'Agadir Ida Outanane, centre d'Aourir.
- Ambroise B. 1991**, Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré – processus et modèles, Séminaire du conseil scientifique du département science du sol de l'INRA à Dijon, mars 1991.
- Application Guide HES, 2001**, Contains a series of examples that demonstrate various aspects of the HEC-RAS.
- Bourgin R. 1952**, Note sur un projet de captage dans l'oued Tamraght, Rapp. inéd. arch.MTPC/DH/DRE, 3 pp. 2 fig.
- Division de la Planification et de la Gestion de l'Eau, Février 2004**, Etude du Plan Directeur de Protection contre les Inondations et Impacts des Ouvrages de Protection sur l'Environnement, Rapport Final, Ministère de l'Aménagement du Territoire de l'Eau et de l'Environnement, Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, Royaume du Maroc, Rabat.
- Duband, D. 1982**, - Hydrologie statistique approfondie. Ecole national supérieure d'hydraulique de Grenoble. pp. II-11.
- Guillot, P. and Duband, D. 1967**, La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, in Floods and Their Computation. Proceedings of the Leningrad Symposium, IASH Publ. 84: 560–569.
- Meylan, P. and Musy, A. (1999)** - Hydrologie fréquentielle. Office fédéral de l'éducation et de la science/suisse (n 96.01). pp 181, 251, 275, 305, 371.

- Naghattini, M. Potter, K.W. and Illangasekare, T. 1996**, Estimating the upper tail of flood-peak frequency distributions using hydrometeorological information. *Water Resources Research*, Vol. 32: 1729-1740.
- PDAIRE Souss Massa, 2011**, Agence du bassin hydraulique de Sebou, Plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eaux Mission I, Etude des eaux de surface.79.
- Ressources en Eau du Maroc, 1975**, Tome 2 : Plaines et Bassins du Maroc Atlantique, Editions du Service Géologique du Maroc, Rabat.
- Royaume du Maroc, Ministère de l'équipement, de la formation des cadres et la formation professionnelle, juillet 1985**. Administration de l'Hydraulique. Barrage Imi Mikki sur l'oued Tamraght. Mission I. HP, HM.
- SAIDI M. (1995)**, Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss (Maroc) Climatologie, Hydrogéologie, crues et bilans hydrologiques en milieu sub-aride, Environnement Global, Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayad Marrakech.
- Société ALFAMAR sa. Centre de Lakhsas**, Province de Tiznit, Etude d'Impact, Carrière de l'oued Tamghart, Commune d'Aourir, Bureau d'Etudes INSAF.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2008**. HEC-RAS (Version 4.1) [Hydraulic Reference Manuel]. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- Wilaya de la région Souss Massa Draa, 2011**. Monographie de la préfecture d'Agadir Ida Outanane, Rapport final, préfecture d'Agadir Ida-Outanane, Ministère de l'intérieure, Royaume du Maroc.

ANNEXES

ANNEXE 1 : L RAPPORT ENTRE LES DEBITS MAXIMUMS JOURNALIERS ET LES DEBITS

MAXIMUMS INSTANTANES DE LA STATION DE TAMRI

Année hydro	Qj max	Qi max	Cp
1991	33.6	125	3.7202
1992	32.4	25.6	0.7901
1993	127	554	4.3622
1994	30.3	173	5.7096
1995	505	1040	2.0594
1996	248	1240	5.0000
1997	272	746	2.7426
1998	36	678	18.8333
1999	39.9	140	3.5088
2000	137	522	3.8102
2001	58.8	374	6.3605
2002	49.3	157	3.1846
2003	25.7	122	4.7471
2004	82.1	85.4	1.0402
2005	25.4	174	6.8504
2006	17.1	83.8	4.9006
2007	47.2	178	3.7712
2008	116	371	3.1983
2009	722	1175	1.6274
2010	128	805	6.2891
2011	5.31	145	27.3070
2012	135	198	1.4667
2013	21.4	204	9.53271028
2014	254	659	2.59448819

Annexe 2 : Les valeurs K1, k2 de la formule de hazan-lazarvick

Zone		Pluviométrie	K1	K2
	Rif central	1000-1300	15.53	0.776
	Rif occidental	800-1000	9.78	0.793
	Rif oriental	600-800	7.58	0.808
Moyen Atlas saharien		700-900	14.94	0.636
		500-700	13.51	0.613
		400-500	13.47	0.587
Haut Atlas Saharien		200-400	9.38	0.742

Annexe 3 : Résultats de l'ajustement par Gumbel

Année	Pj max	rang	fréquence empirique selon Hazen	variable réduite de Gumbel u
2007	18.8	1	0.02	-1.43
1991	21.5	2	0.05	-1.12
2006	22	3	0.08	-0.94
1999	26.2	4	0.11	-0.79
2011	30.6	5	0.14	-0.67
1998	31.6	6	0.17	-0.57
2005	33	7	0.20	-0.47
1993	35.5	8	0.23	-0.37
1986	35.6	9	0.27	-0.28
2003	36	10	0.30	-0.19
2004	36	10	0.30	-0.19
1984	37.7	12	0.36	-0.02
1994	39.4	13	0.39	0.06
1983	42.2	14	0.42	0.15
2008	42.4	15	0.45	0.23
2012	43.8	16	0.48	0.32
1989	44.3	17	0.52	0.41
2010	46.7	18	0.55	0.50
2001	47.8	19	0.58	0.60
2009	48.5	20	0.61	0.70
1990	50.4	21	0.64	0.81
2013	50.5	22	0.67	0.92
2014	54.3	23	0.70	1.04
2002	56	24	0.73	1.18
1997	57.2	25	0.77	1.32
2000	57.2	25	0.77	1.32
1995	58.6	27	0.83	1.67
1996	60.7	28	0.86	1.89
1985	62.9	29	0.89	2.16
1992	64.5	30	0.92	2.51
1987	66.9	31	0.95	3.04
1988	80.6	32	0.98	4.15

Annexe 4 : Résultats graphiques des simulations hydraulique

